

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт: Энергетический  
Специальность: 14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг  
Кафедра: Атомных и тепловых электростанций

**ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ**

| Тема работы  |
|--|
| <b>ПРОЕКТ ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ ДЛЯ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ<br/>ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ ГАММА-КВАНТОВ ДЕЛЕНИЯ <math>U^{235}</math> И <math>Pu^{239}</math></b> |

УДК 621.039.55.001.6

Студент

| Группа      | ФИО                                | Подпись | Дата |
|-------------|------------------------------------|---------|------|
| <b>5011</b> | <b>КАБАНОВА Марина Анатольевна</b> |         |      |

Руководитель

| Должность                      | ФИО                 | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|--------------------------------|---------------------|---------------------------|---------|------|
| <b>Доцент кафедры<br/>АТЭС</b> | <b>А.В. Кузьмин</b> | <b>к.т.н., доцент</b>     |         |      |

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность                             | ФИО                   | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------|---------|------|
| <b>Доцент<br/>кафедры менеджмента</b> | <b>С.И. Сергейчик</b> | <b>к.т.н.</b>             |         |      |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность   | ФИО                    | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|---|------------------------|---------------------------|---------|------|
| <b>Доцент кафедры<br/>экологии и<br/>безопасности<br/>жизнедеятельности</b> | <b>Ю.А. Амелькович</b> | <b>к.т.н.</b>             |         |      |

По разделу «Автоматизация технологических процессов и производств»

| Должность   | ФИО               | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|---|-------------------|---------------------------|---------|------|
| <b>Доцент кафедры<br/>автоматизации<br/>теплоэнергетических<br/>процессов</b> | <b>В.С. Андык</b> | <b>к.т.н.</b>             |         |      |

Нормоконтроль

| Должность                                     | ФИО                | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|---|--------------------|---------------------------|---------|------|
| <b>Ст. преподаватель<br/>кафедры<br/>АТЭС</b> | <b>М.А. Вагнер</b> | <b>-</b>                  |         |      |

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

| Должность  | ФИО                 | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|--|---------------------|---------------------------|---------|------|
| <b>Зав. кафедрой атомных<br/>и тепловых<br/>электростанций</b> | <b>А.С. Матвеев</b> | <b>к.т.н., доцент</b>     |         |      |

Томск – 2017

## ЗАПЛАНИРОВАННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

| Код<br>резул<br>ь-<br>тата | Результат обучения<br>(выпускник должен быть готов)  | Требования ФГОС ВО,<br>критериев и/или<br>заинтересованных сторон  |
|----------------------------|--|--|
|                            | <b>Универсальные компетенции</b>   |  |
| P1                         | Использовать методологические основы современной картины мира для научного познания и творчества, выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в профессиональной деятельности  | Требования ФГОС (ОК- 1, ПК-10),<br>Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>       |
| P2                         | Анализировать социально-значимые процессы и явления, экономические проблемы и общественные процессы, ответственно участвовать в общественно-политической жизни, применять методы социального взаимодействия на основе принятых моральных и правовых норм                         | Требования ФГОС (ОК-2, 5, 9), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>            |
| P3                         | Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, в том числе на иностранном языке, разрабатывать документацию, презентовать и публично защищать результаты, владеть методами пропаганды научных достижений   | Требования ФГОС (ОК-3 – 5), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>              |
| P4                         | Использовать системный подход в профессиональной деятельности, ставить цели и выбирать пути их достижения, обобщать, анализировать, критически осмысливать, систематизировать  | Требования ФГОС (ОК-6, ПК-1), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>            |
| P5                         | Осознавать необходимость и демонстрировать способность к самостоятельному обучению в течение всей жизни, непрерывному самосовершенствованию, развитию социальных и профессиональных компетенций, использовать полученные знания для обучения и воспитания новых кадров           | Требования ФГОС (ОК-7 ПК-3), Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>             |
| P6                         | К достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности и должного уровня безопасности жизнедеятельности, в том числе, защиты персонала и населения от последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий | Требования ФГОС (ОК-8; ОПК-1, ПК-7, 19), Критерий 5 АИОР (п. 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> |

|     |  |  |
|-----|--|--|
| P7  | Эффективно работать индивидуально и в коллективе, в том числе, многонациональном, принимать ответственность за свои решения, в том числе, нестандартные, управлять коллективом, находить организационно-управленческие решения в нестандартных ситуациях | Требования ФГОС (ОК-10, 13, 14, ПК-3), Критерий 5 АИОР (пп.2.3, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>        |
| P8  | Использовать информационные технологии для работы с информацией, управления ею и создания новой информации; работать с информацией в глобальных компьютерных сетях, осознавать и соблюдать основные требования информационной безопасности               | Требования ФГОС (ОК-12, ПК-2, 6, 13, 26, ПСК-1.5), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> |
|     | <b>Профессиональные компетенции</b>  |  |
| P9  | Понимать значимость своей специальности, стремиться к ответственному отношению к своей трудовой деятельности, демонстрировать особые компетенции, связанные с уникальностью задач, объектов в области проектирования и эксплуатации АС                   | Требования ФГОС (ПК-4), Критерий 5 АИОР (п. 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>                            |
| P10 | Использовать глубокие математические, естественнонаучные знания в профессиональной деятельности с применением математического моделирования объектов и процессов в области проектирования и эксплуатации АС  | Требования ФГОС (ОК-1, ПК-9 – 11), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>                 |
| P11 | Проводить <i>инновационные</i> научные исследования систем и оборудования атомных электрических станций и ядерных энергетических установок, участвовать во внедрении результатов исследований  | Требования ФГОС (ОПК-2, ПК-5, 9, 14, 15, 16), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>      |
| P12 | Анализировать и использовать научно-техническую информацию, формулировать цели проекта, ставить и решать инновационные задачи <i>комплексного</i> инженерного анализа в области проектирования и эксплуатации АС   | Требования ФГОС (ПК-12; 17, 20), Критерий 5 АИОР (п. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>                   |
| P13 | Выбирать, создавать и использовать оборудование атомных электрических станций и ядерных энергетических установок, средства измерения теплофизических параметров и автоматизированного управления, защиты и контроля технологических процессов            | Требования ФГОС (ОПК-3, ПК-18), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>                    |

|     |   |  |
|-----|---|--|
| P14 | Проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных разработок систем и оборудования АС и ядерных энергетических установок, готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений, выполнять <i>инновационные</i> инженерные проекты с применением <i>базовых и специальных</i> знаний, современных методов проектирования для достижения оптимальных результатов с учетом принципов и средств обеспечения ядерной и радиационной безопасности | Требования ФГОС (ПК-20, 21, 23 – 25, ПСК-1.5, 1.6, 1.8, 1.10), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> |
| P15 | Разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформлять законченные проектно-конструкторские работы в области проектирования АС   | Требования ФГОС (ПК-22), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>                                       |
| P16 | Анализировать нейтронно-физические, технологические процессы и алгоритмы контроля, диагностики, управления и защиты, проводить нейтронно-физические, теплогидравлические и прочностные расчеты оборудования АС и его элементов в стационарных и нестационарных режимах работы   | Требования ФГОС (ПК-27, 28, ПСК-1.4), Критерий 5 АИОР (п. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>                          |
| P17 | Делать оценку ядерной и радиационной безопасности при эксплуатации ядерных энергетических установок, а также при обращении с ядерным топливом и другими отходами  | Требования ФГОС (ПК-29), Критерий 5 АИОР (п. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>                                       |
| P18 | Применять основы обеспечения оптимальных режимов работы ядерного реактора, тепломеханического оборудования и энергоблока АС в целом при пуске, останове, работе на мощности и переходе с одного уровня мощности на другой с соблюдением требований безопасности, выполнять типовые операции по управлению реактором и энергоблоком на функционально-аналитическом тренажере   | Требования ФГОС (ПК- 28, 10, 11, , ПСК-1.14, 1.15), Критерий 5 АИОР (п. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>            |
| P19 | Анализировать технологии монтажа, ремонта и демонтажа оборудования АС применительно к условиям сооружения, эксплуатации и снятия с эксплуатации энергоблоков АС   | Требования ФГОС (ПК-13,14), Критерий 5 АИОР (п. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>                                    |

|     |  |   |
|-----|--|---|
| P20 | Осуществлять и анализировать технологическую деятельность как объект управления, организовывать рабочие места, обеспечивать их техническое оснащение, размещать технологическое оборудование, контролировать соблюдение технологической дисциплины и обслуживать технологическое оборудование, исследовать причины его неисправностей, принимать меры по их устранению | Требования ФГОС (ПСК-1.9), Критерий 5 АИОР (п. 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>              |
| P21 | Составлять техническую документацию и организовывать экспертизу технической документации, составлять установленную отчетность по утвержденным формам, управлять малыми коллективами исполнителей, планировать работу персонала и фонды оплаты труда  | Требования ФГОС (ПСК-1.9), Критерий 5 АИОР (пп. 2.2, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>        |
| P22 | Выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов ядерных энергетических установок, проводить анализ производственных затрат на обеспечение необходимого качества продукции   | Требования ФГОС (ПСК-1.11), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>             |
| P23 | Составлять и использовать тепловые схемы и математические модели процессов и аппаратов ядерно-энергетических и тепломеханических установок различных типов АС, готовить исходные данные для расчета тепловых схем  | Требования ФГОС (ПСК-1.1, 1.3, 1.7), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>    |
| P24 | Проводить физические эксперименты на этапах физического и энергетического пуска энергоблока с целью определения нейтронно-физических параметров реакторной установки и АС в целом  | Требования ФГОС (ПСК-1.2), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>              |
| P25 | Применять на практике принципы организации эксплуатации современного оборудования и приборов АС, понимать принципиальные особенности стационарных и переходных режимов реакторных установок и энергоблоков и причины накладываемых ограничений при нормальной эксплуатации, при её нарушениях, при ремонте и перегрузках   | Требования ФГОС (ПК-8, ПСК-1.12, 1.13), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> |

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт: Энергетический  
Специальность: 14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг  
Кафедра: Атомных и тепловых электростанций

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой АТЭС ЭНИН  
А.С. Матвеев

\_\_\_\_\_  
(Подпись)

\_\_\_\_\_  
(Дата)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

|  |
|--|
| <b>дипломной работы</b>                                  |
| (бакалаврской работы, /работы, магистерской диссертации) |

Студенту:

| Группа      | ФИО                                 |
|-------------|-------------------------------------|
| <b>5011</b> | <b>Кабановой Марине Анатольевне</b> |

Тема работы:

|  |                    |
|--|--------------------|
| <b>Проект источника нейтронов для системы регистрации запаздывающих гамма-квантов деления <math>U^{235}</math> и <math>Pu^{239}</math></b> |                    |
| Утверждена приказом директора (дата, номер)  | 11.11.2016 №9734/с |

Срок сдачи студентом выполненной работы:

20 января 2017 г.

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

**Исходные данные к работе**

*(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).*

Отчет по преддипломной практике. Материалы РНЦ «КИ». Материалы статей, диссертаций, учебная и научно-техническая литература, посвященная исследовательским реакторам и вопросам гамма-спектрометрии.

|  |  |
|--|--|
| <p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Обзор литературы;</li> <li>2. Объект и методы исследования;</li> <li>3. Теоретически-расчетное обоснование выбора компонентов эксперимента;</li> <li>4. Подготовка параметров;</li> <li>5. Теплогидравлический расчет аз реактора;</li> <li>6. Нейтронно-физический расчет реактора;</li> <li>7. Результаты разработки проекта.</li> </ol>                               |
| <p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Общий вид реактора ИР-8 – 1 л. формата А0;</li> <li>2. Схема энергетическая расположения картограммы загрузки аз – 1 л. формата А1.</li> <li>3. Сборочный чертеж ТВС – 1 л. формата А1.</li> <li>4. Компонировка экспериментальной системы – 1 л. формата А1.</li> <li>5. Функциональная схема автоматического регулирования мощности ИР-8 – 1 л. формата А2.</li> </ol> |
| <p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>  |  |
| <b>Раздел</b>  | <b>Консультант</b>   |
| <b>Финансовый менеджмент</b>   | Сергейчик С.И., доцент кафедры менеджмента   |
| <b>Социальная ответственность</b>  | Амелькович Ю.А., доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности  |
| <b>Автоматизация технологических процессов</b>   | Андык В.С., доцент кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов   |

|  |            |
|--|------------|
| Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику | 22.06.2016 |
|--|------------|

**Задание выдал руководитель:**

| Должность           | ФИО          | Ученая степень, звание | Подпись | Дата       |
|---------------------|--------------|------------------------|---------|------------|
| Доцент кафедры АТЭС | Кузьмин А.В. | к.т.н.                 |         | 22.06.2016 |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО                         | Подпись | Дата       |
|--------|-----------------------------|---------|------------|
| 5011   | Кабанова Марина Анатольевна |         | 22.06.2016 |

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                          |
|---------------|-------------------------------------|
| <b>5011</b>   | <b>Кабановой Марине Анатольевне</b> |

| <b>Институт</b>            | <b>ЭНИН</b>       | <b>Кафедра</b>                   | <b>АТЭС</b>  |
|----------------------------|-------------------|----------------------------------|--|
| <b>Уровень образования</b> | <b>Специалист</b> | <b>Направление/специальность</b> | <b>14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг</b> |

|   |  |
|---|--|
| <b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:</b>   |  |
| <i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i> |  |
| <i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>   |  |
| <i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>                                  |  |
| <b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>   |  |
| <i>1. Расчет технико-экономических показателей</i>  |  |
| <i>2. Расчет себестоимости вырабатываемой продукции ИП</i>  |  |
| <b>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)</b>   |  |
|   |  |

|   |                   |
|---|-------------------|
| <b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b> | <b>15.10.2016</b> |
|---|-------------------|

**Задание выдал консультант:**

| <b>Должность</b>           | <b>ФИО</b>     | <b>Ученая степень, звание</b> | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
|----------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| Доцент кафедры менеджмента | Сергейчик С.И. | к.т.н.                        |                | 15.10.2016  |

**Задание принял к исполнению студент:**

| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                  | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
|---------------|-----------------------------|----------------|-------------|
| 5011          | Кабанова Марина Анатольевна |                | 15.10.2016  |



# ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

|               |                                     |
|---------------|-------------------------------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                          |
| <b>5011</b>   | <b>Кабановой Марине Анатольевне</b> |

|                            |                   |                                  |  |
|----------------------------|-------------------|----------------------------------|--|
| <b>Институт</b>            | <b>ЭНИН</b>       | <b>Кафедра</b>                   | <b>АТЭС</b>  |
| <b>Уровень образования</b> | <b>Специалист</b> | <b>Направление/специальность</b> | <b>14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг</b> |

## Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения

## Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

### 1. Производственная безопасность

1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:

- физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;
- действие фактора на организм человека;
- приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);
- предлагаемые средства защиты;
- (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).

1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:

- механические опасности (источники, средства защиты);
- термические опасности (источники, средства защиты);
- электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты).

|   |  |
|---|--|
| <b>2. Экологическая безопасность:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– защита селитебной зоны</li> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> <li>– разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</li> </ul> |  |
| <b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</li> <li>– выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>   |  |
| <b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>   |  |

|   |                   |
|---|-------------------|
| <b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b> | <b>15.10.2016</b> |
|---|-------------------|

**Задание выдал консультант:**

| <b>Должность</b>   | <b>ФИО</b>      | <b>Ученая степень, звание</b> | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
|--|-----------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности | Амелькович Ю.А. | к.т.н.                        |                | 15.10.2016  |

**Задание принял к исполнению студент:**

| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                  | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
|---------------|-----------------------------|----------------|-------------|
| 5011          | Кабанова Марина Анатольевна |                | 15.10.2016  |

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из: 103 с., 11 рисунков, 28 таблиц, 54 источников, 4 приложений.

Ключевые слова: гамма-квант, детектор, делящийся материал, исследовательский реактор, активная зона, ТВС, замедлитель, отражатель, сечение, нейтрон, диффузия, коэффициент, плотность потока нейтронов.

Объектом разработки являются: источник нейтронов ИР-8, система регистрации запаздывающих гамма-квантов.

Цель работы – разработка источника нейтронов для системы регистрации запаздывающих  $\gamma$ -квантов от тепловых нейтронов деления для  $U^{235}$  и  $Pu^{239}$  в промежутке времени меньше чем 1 мкс после деления ядра.

В процессе разработки проводилось экспериментальное и расчетное определение характеристик компонентов эксперимента (эффективность регистрации детектором запаздывающих  $\gamma$ -квантов, интенсивность источника нейтронов). Выбор прототипа источника нейтронов. Тепловой и нейтронно-физический расчет реактора ИР-8. Анализ функционирования системы.

В результате разработки проекта источника нейтронов, получены физические и технические характеристики, позволяющие осуществить данный эксперимент.

Основные полученные характеристики: плотность потока тепловых и быстрых нейтронов реактора ИР-8 соответственно  $\Phi_m = 6,8 \cdot 10^{14} \text{ н}/(\text{см}^2 \text{с})$  и  $\Phi_b = 3,7 \cdot 10^{15} \text{ н}/(\text{см}^2 \text{с})$ , эффективность регистрации полупроводниковым детектором запаздывающих гамма-квантов наиболее интенсивной линии  $\epsilon_\gamma = 0,0069 \text{ имп}/\text{квант}$ , средний тепловой поток с поверхности ТВЭЛов  $\bar{q}_f = 343,4 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$ , эффективная температура топлива  $73,7^\circ \text{C}$ , эффективный коэффициент размножения нейтронов 1,07.

Данная установка может использоваться для широкого круга научных и промышленных исследований.

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 11   |

## ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

аз — активная зона

ВЭК — вертикальные экспериментальные каналы

ГЭК — горизонтальные экспериментальные каналы

ДМ — делящийся материал

ЖРО — жидкие радиоактивные отходы

ИР — исследовательский реактор

ППД — полупроводниковый детектор

РНЦ «КИ» — Российский научный центр «Курчатовский институт»

СУЗ — Система управления и защиты

ТВС — тепловыделяющие сборки

ТН — теплоноситель

ТВЭЛ — тепловыделяющий элемент

ТРО — твердые радиоактивные отходы

ОЯТ — отработавшее ядерное топливо

## Оглавление

|  |    |
|--|----|
| Введение .....   | 15 |
| 1. Обзор литературы .....  | 18 |
| 2. Объект и методы исследования.....                                     | 20 |
| 3. Теоретически расчетное обоснование выбора компонентов эксперимента .  | 23 |
| 4. Подготовка параметров к расчету реактора ИР-8 .....                   | 27 |
| 4.1. Определение объемных долей компонентов АЗ .....                     | 27 |
| 4.2. Определение расхода теплоносителя.....                              | 29 |
| 5. Теплогидравлический расчет АЗ реактора ИР-8 .....                     | 32 |
| 5.1. Вычисление тепловых потоков ТВС.....                                | 32 |
| 5.2. Расчет эффективной температуры в твэле средней мощности.....        | 35 |
| 6. Нейтронно-физический расчет реактора .....                            | 38 |
| 6.1. Определение ядерных плотностей нуклидов.....                        | 38 |
| 6.2. Определение средней температуры нейтронного газа по ячейке.....     | 39 |
| 6.3. Определение энергии сшивки .....                                    | 40 |
| 6.4. Вычисление микроскопических сечений реакций .....                   | 43 |
| 6.5. Расчет коэффициента размножения активной зоны .....                 | 45 |
| 6.6. Подготовка двухгрупповых констант для расчета реактора .....        | 51 |
| 6.7. Плотность потока быстрых и тепловых нейтронов .....                 | 54 |
| 7. Результаты разработки проекта.....                                    | 54 |
| 7.1. Оценка возможностей применимости системы.....                       | 57 |
| 8. Система автоматического регулирования уровня мощности .....           | 59 |
| 8.1. Канал автоматического регулирования .....                           | 59 |
| 8.2. Описание принципиальной схемы контроля и автоматизации ИР-8 .....   | 59 |
| 8.3. Выбор технических средств .....                                     | 60 |
| 8.4. Работа системы автоматического регулирования .....                  | 62 |
| 9. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ..... | 64 |
| 9.1. Планирование капиталовложений.....                                  | 65 |
| 9.2. Планирование годовых издержек производства .....                    | 65 |
| 9.3. Удельная стоимость ядерного топлива .....                           | 65 |

|  |     |
|--|-----|
| 9.4. Расчет фонда зарплаты .....                                       | 66  |
| 9.5. Амортизационные отчисления .....                                  | 66  |
| 9.6. Планирование прочих расходов .....                                | 67  |
| 9.7. Себестоимость продукции реактора ИР .....                         | 67  |
| 9.8. Оценка прибыли и рентабельности ИР .....                          | 67  |
| 10. Социальная ответственность .....                                   | 71  |
| 10.1 Производственная безопасность .....                               | 71  |
| 10.2 Экологическая безопасность .....                                  | 83  |
| 10.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....                       | 86  |
| 10.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности ..... | 88  |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....   | 92  |
| СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ .....  | 95  |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....                                   | 96  |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А .....   | 100 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б — К определению возраста в отражателе .....               | 101 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В .....   | 102 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....   | 103 |

#### ГРАФИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ:

ФЮРА.693100.002 ВО – Реактор ИР-8. Общий вид.

ФЮРА.693100.003 Р7 – Картограмма загрузки аз. Схема энергетическая  
расположения.

ФЮРА.693100.004 СБ – Тепловыделяющая сборка. Сборочный чертеж.

ФЮРА.693100.005 ВО – Компоновочный чертеж экспериментальной системы.  
Общий вид.

ФЮРА.421000.000.С01 – Канал автоматического регулирования мощности ИР-8.  
Функциональная схема.

## ВВЕДЕНИЕ

Процесс деления ядра сопровождается мгновенным выходом частиц (осколки деления, нейтроны и гамма ( $\gamma$ )-кванты), причем характерное время процесса составляет  $10^{-11}$  с, и запаздывающим излучением нейтронов и  $\gamma$ -квантов осколками деления. Наименее изучен диапазон времени после деления ядра менее 1 мкс, характеризующееся выходом запаздывающих  $\gamma$ -квантов, снимающих возбуждение ядер осколков деления.

Регистрация запаздывающих гамма-квантов деления  $U^{235}$  и  $Pu^{239}$  в интервале менее 1 мкс после момента деления, позволяет идентифицировать в этих веществах ранее неизвестные, быстро распадающиеся элементы, образующиеся в результате ядерных реакций с нейтронами источника.

Актуальность выполненной работы: на данный момент времени  $U^{235}$  и  $Pu^{239}$  являются основным и перспективным нуклидами, использующимся в оборонных и промышленных целях. Поэтому необходимо обеспечить возможность полного изучения изменения характеристик делящихся нуклидов под воздействием нейтронов различных энергий.

Над этим вопросом в 70 годах работала группа американских ученых национальной лаборатории Livermor, они получили результаты для  $U^{235}$  и  $Pu^{239}$  от источника тепловых нейтронов [1]. Эти данные нуждаются в современном уточнении и расширении, при использовании источника не только тепловых, но и быстрых нейтронов. Источник нейтронов инициирует ядерные реакции в образце, вследствие которых вылетают запаздывающие  $\gamma$ -кванты.

Цель работы: спроектировать источник нейтронов, способный генерировать потоки тепловых и быстрых нейтронов, значения которых удовлетворяют экспериментально полученным критериям проведения эксперимента по регистрации запаздывающих гамма-квантов деления  $U^{235}$  и  $Pu^{239}$  в интервале менее 1 мкс.

Задачи:

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 15   |

-произвести теоретически-расчетное обоснование выбора компонентов эксперимента,

-произвести тепловой и нейтронно-физический расчет источника нейтронов типа ИР-8,

-сделать оценку возможности применения данной системы для изучения выхода запаздывающих гамма-квантов деления  $U^{235}$  и  $Pu^{239}$ .

Источник должен иметь высокую интенсивность, т.к. от этого зависит эффективность регистрации квантов детектором. Поэтому прототипом был выбран реактор типа ИР-8, который работая на мощности 8 МВт, имеет плотности потока нейтронов в среднем в 4 раза выше, чем в подобных реакторах [2]. Реактор ИР-8 был введен в эксплуатацию в РНЦ «КИ» в 1981 г. для проведения фундаментальных и прикладных исследований в различных областях науки. По своим конструктивным и технологическим характеристикам, физическим параметрам, уникальному экспериментальному оснащению, широте и новизне приводящихся исследований реактор ИР-8 намного превосходит все подобные установки такого класса [3].

Объект исследования: система регистрации запаздывающих гамма-квантов. Предмет исследования: источник нейтронов ИР-8.

Научная новизна: обоснование проведения эксперимента с источником нейтронов средней энергии спектра деления 2 МэВ.

Практическая новизна: уточнение коэффициента теплопроводности алюминиевого сплава оболочки и матрицы топлива твэла в зависимости от температуры при проведении теплового расчета источника нейтронов.

Практическая значимость результатов работы: подготовка экспериментальных характеристик компонентов опыта была проведена на базе РФЯЦ ВНИИТФ г. Снежинск. По результатам расчета было доказано: источника требуемой интенсивности нет в наличии в данном центре и необходимо его проектирование.



Спроектированный источник нейтронов может быть построен в этом исследовательском центре, где имеются все необходимые компоненты эксперимента, а так же в других ядерных центрах, заинтересованных в проведении экспериментальных и промышленных исследований с использованием высокоинтенсивного источника нейтронов.

Результаты экспериментальных исследований, расчетного обоснования проведения опыта и необходимости проектирования источника были представлены на семинаре научно исследовательского отдела в г. Снежинке и на VII Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» в г. Томске.

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 17   |

## 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Возможность практического применения гамма-спектрометрии для анализа свойств материалов при воздействии облучения описывается в учебном пособии [4]. Справочным пособием [5] необходимо руководствоваться чтобы получить спектр, выбрать вид детектора и провести математическую обработку результатов  $\gamma$ -спектрометрических измерений.

Для обработки полученного спектра  $\gamma$ -квантов ознакомилась со спектрометрическим программным обеспечением Genie 2000 компании Canberra [6]. Она представляет собой полный набор программных средств для набора и обработки спектров с многоканальных анализаторов. С помощью программного обеспечения эмулятора МКА MAESTRO-32 версии 6, поддерживающего детектор фирмы ORTEC, возможно производить амплитудно-импульсный анализ, сохранять и отображать данные набираемого спектра и иметь доступ к функциям электронно-вычислительного тракта через удобный пользовательский интерфейс. [7]

Впервые измерения запаздывающей составляющей гамма-излучения в диапазоне времен от 50 нс до 10 мкс после деления ядра урана-235, индуцированного тепловыми нейтронами, была изучена Майншейном [8].

В 1974 году американскими учеными были впервые получены результаты регистрации запаздывающих  $\gamma$ -квантов от тепловых нейтронов деления для  $U^{235}$  и  $Pu^{239}$  в промежутке времени меньше чем 1 мкс после деления ядра. Для этих делящихся материалов наблюдались 80 разрешенных и из них 37 ранее не регистрируемых пиков. Полученное количество зарегистрированных  $\gamma$ -квантов на одно деление ядра и энергии пиков позволили идентифицировать присутствующие и быстро распадающиеся неизвестные компоненты топлива. Для деления использовали нейтроны, полученные на реакторе TRIGA[1].

Практический интерес представляет получение результатов не только для тепловых нейтронов, но и для нейтронов средней энергии спектра деления 2 МэВ. Поэтому, ознакомившись с характеристиками

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 18   |

исследовательских реакторов [9], мы выбрали прототипом реактор ИР-8, имеющий высокую плотность потоков нейтронов и подходящую геометрию для проведения эксперимента. Для теплогидравлического расчета аз реактора использовали новые данные по свойствам алюминиевого сплава САВ-1, использующегося в оболочке и топливе твэлов [10,11,12], и эмпирические формулы, характерные для расчета трубных твэлов [13,14]. Для нейтронно-физического расчета реактора руководствовались источниками [15-20]. После получения нейтронно-физических характеристик для шеститрубных ТВС ИРТ-3М аз реактора ИР-8, сравниваем полученные результаты с результатами двухгруппового расчета аналогичных ТВС для реактора ИРТ-Т [21].

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 19   |

## 2. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проводится исследование возможности получения энергетических зависимостей выхода запаздывающих  $\gamma$ -квантов осколков деления  $U^{235}$  и  $Pu^{239}$  после деления на тепловых нейтронах и нейтронах средней энергии 2МэВ в диапазоне времени менее 1мкс.

Для этого необходимо:

-произвести теоретически-расчетное обоснование выбора компонентов эксперимента,

-произвести тепловой и нейтронно-физический расчет источников нейтронов,

-оценить возможность применения разработанной системы для изучения выхода запаздывающих  $\gamma$ -квантов деления  $U^{235}$  и  $Pu^{239}$ .

Рассматриваемый метод индуцирования делений основан на облучении образцов делящегося материала потоком нейтронов, а затем снятия  $\gamma$ -спектра.

Для осуществления данного эксперимента необходима установка рисунок 1., которая состоит из: источника нейтронов, слоя делящегося материала, детекторов  $\gamma$ -излучения и осколков делящегося материала.

Нейтроны испускаются источником. Пройдя коллиматор, защищающий от рассеяния и поглощения нейтронов, они взаимодействуют со слоем делящегося материала. В результате реакции деления образуются осколки деления, которые за интервал в несколько мс могут испытать распад с образованием изотопов, способных излучать нейтроны и запаздывающие  $\gamma$ -кванты. При этом осколки регистрируются детектором осколков, а запаздывающие  $\gamma$ -кванты детектором  $\gamma$ -квантов.

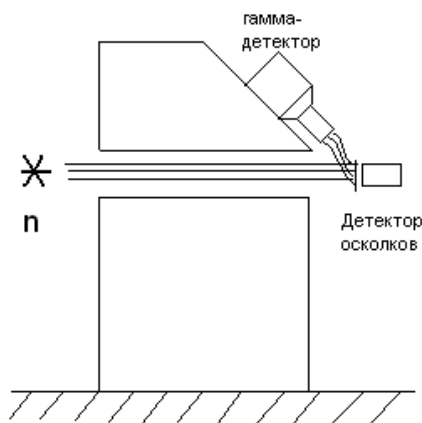


Рисунок 1 - Схема установки регистрации  $\gamma$ -квантов

Источник нейтронов - исследовательский реактор бассейнового типа ИР-8 обладает уникальными возможностями исследования на базе 12 ГЭК для вывода нейтронных пучков и 29 различных ВЭК в активной зоне и отражателе, имея высокую плотность потока тепловых нейтронов в области отражателя и большую плотность потока быстрых нейтронов в аз.

Для этого при проектировании были предусмотрены физические особенности:

- в активной зоне используются тепловыделяющие сборки с высоким коэффициентом размножения и малой длиной миграции нейтронов ТВС типа ИРТ-3М. Они отличаются от ранее использующихся ТВС вдвое большей поверхностью теплоотдачи и загрузкой  $U^{235}$ . Такие характеристики ТВС приводят к малым размерам активной зоны и большим утечкам нейтронов в отражатель.

-отражатель должен иметь большую длину миграции нейтронов, чтобы обеспечить достаточно высокий уровень плотности тепловых нейтронов в экспериментальных каналах.

Активная зона реактора ИР-8 (рис. А.1) состоит из шестнадцати ТВС ИРТ-3М трубчатого типа квадратного сечения. В 12 ТВС установлены каналы со стержнями СУЗ: 2 со стержнями аварийной защиты и 10 со стержнями компенсации реактивности. Во всех стержнях СУЗ в качестве

поглотителя используются таблетки карбида бора, оболочки стержней – из нержавеющей стали.

В качестве отражателя в реакторе ИР-8 используется металлический бериллий. Отражатель состоит из двух частей: внутренней, образованной сменными бериллиевыми блоками и наружной, образованной призматическими бериллиевыми блоками. Отражатель фиксируется в алюминиевом корпусе.

Корпус с опорной решёткой, на которой устанавливаются ТВС и блоки отражателя, располагается на промежуточном дне заполненного водой бассейна реактора. Облицовкой бассейна является бак из нержавеющей стали [2].

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 22   |

### 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИ - РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОМПОНЕНТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения эксперимента необходимо знать характеристики компонентов: слоев ДМ, детекторов  $\gamma$ -квантов и осколков и источника нейтронов. рис.2.

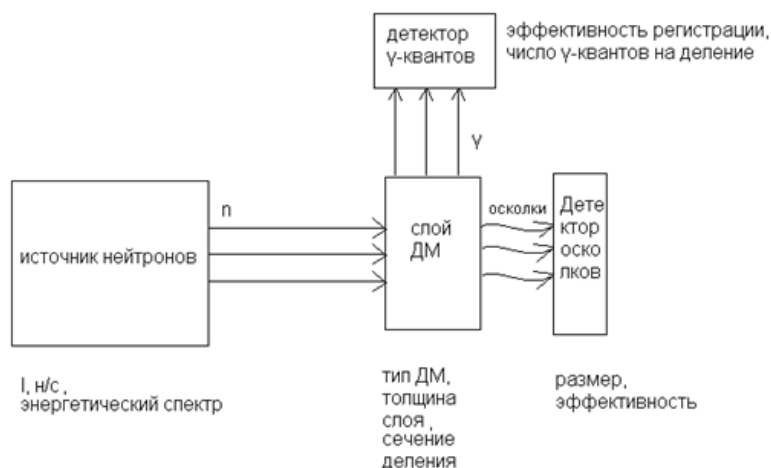


Рисунок 2 - Структурная схема эксперимента

Имеем характеристики слоев ДМ, таблица 1.

Таблица 1- Паспортные характеристики делящихся слоев

| Тип ДМ                                    | $U^{235}$ | $Pu^{239}$ |
|---|-----------|------------|
| Количество, $m, \text{мкг}$               | 232       | 249        |
| Объемная плотность, $\rho, \text{г/см}^3$ | 18,8      | 19,6       |

Выбираем полупроводниковый детектор из сверхчистого германия, имеющий наилучшее разрешение, т.к. будет производиться регистрация сложного спектра.

Таблица 2 – Паспортные данные ППД детектора

|  |   |   |
|--|---|---|
| Обеспечение  |   | Детектор-ORTEC CONNECTIONS-32 – программный комплекс MAESTRO-32 |
| Размеры цилиндра, мм   | d | 69,9  |
|  | H | 75,8  |
| Расстояние от торца, мм  |   | 4   |
| Толщина материала торца, мм                                      |   | Be (0,5)  |
| Разрешение при 1,33 МэВ, $^{60}\text{Co}$ , кэВ                  |   | 2,1   |
| Относительная эффективность при 1,33 МэВ, $^{60}\text{Co}$ , кэВ |   | 67%   |

Проводим калибровку ППД от разных источников таблица 3. В результате которой получаем данные: энергии фотопиков  $E$ , живое время набора спектра  $t_{\text{жив}}$ , площадь пиков  $S_{\gamma}$ .

Находим эффективность регистрации детектором пиков всех

элементов: 
$$\varepsilon_{\gamma} = \frac{S_{\gamma}}{t_{\text{жив}} \cdot A \cdot I_{\gamma}}$$

где,  $\varepsilon_{\gamma}$  - эффективность детектора по пику полного поглощения данного  $\gamma$ -кванта,  $A$ - активность источника на время измерения,  $I_{\gamma}$  - квантовый выход данного  $\gamma$ -излучения.

Зная из паспортных данных значение активности источников на 01.04.2013 г., рассчитаем время, за которое активность источника уменьшалась по закону радиоактивного распада -  $t=1167$  сут.

Находим активность источника на данный момент времени:

$$A(t) = A_0 \exp(-\lambda t), \text{ где } \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} - \text{постоянная распада элемента, } T_{1/2} - \text{период}$$

полураспада. Вычисленные значения и информация о выбранных источниках представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики радионуклидов при определении эффективности детектора [3]

| Радионуклид       | Паспортные и полученные |                             |                 |             |                      |                     | Рассчитанные               |           |                                    |
|-------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------|-------------|----------------------|---------------------|----------------------------|-----------|------------------------------------|
|                   | Е, кэВ                  | $I_{\gamma}$ , квант/распад | $T_{1/2}$ , сут | $A_0$ , кБк | $t_{\text{жив}}$ , с | $S_{\gamma}$ , имп. | $\lambda$ , 1/сут * $10^6$ | $A$ , кБк | $\varepsilon_{\gamma}$ , имп/квант |
| Am <sup>241</sup> | 59,884                  | 0,36                        | 157861,1        | 9,8         | 3522,28              | 15476,44            | 4,391                      | 9,75      | 0,00125                            |
| Ba <sup>133</sup> | 81,018                  | 0,3411                      |                 |             |                      | 53210,46            |                            |           | 0,00395                            |
|                   | 276,391                 | 0,07147                     |                 |             |                      | 13118,54            |                            |           | 0,00464                            |
|                   | 302,824                 | 0,183                       |                 |             |                      | 30237,01            |                            |           | 0,00418                            |
|                   | 356,005                 | 0,6194                      |                 |             |                      | 87769,04            |                            |           | 0,00359                            |
|                   | 383,857                 | 0,08905                     |                 |             |                      | 11931,75            |                            |           | 0,00339                            |
| Eu <sup>152</sup> | 122,051                 | 0,2838                      | 4865,13         | 8,8         | 7131,82              | 93767,84            | 142,5                      | 7,45      | 0,00622                            |
|                   | 244,961                 | 0,0751                      |                 |             |                      | 22988,22            |                            |           | 0,00576                            |
|                   | 344,538                 | 0,2658                      |                 |             |                      | 50255,97            |                            |           | 0,00356                            |
|                   | 411,402                 | 0,0223                      |                 |             |                      | 3512,01             |                            |           | 0,00296                            |
|                   | 444,281                 | 0,0312                      |                 |             |                      | 4477,12             |                            |           | 0,00270                            |
|                   | 779,207                 | 0,1296                      |                 |             |                      | 11592,58            |                            |           | 0,00168                            |
|                   | 867,663                 | 0,0421                      |                 |             |                      | 3489,75             |                            |           | 0,00156                            |
|                   | 964,381                 | 0,1452                      |                 |             |                      | 10716,71            |                            |           | 0,00139                            |
|                   | 1112,448                | 0,1356                      |                 |             |                      | 8849,82             |                            |           | 0,00123                            |
|                   | 1408,519                | 0,2085                      |                 |             |                      | 11230,52            |                            |           | 0,00101                            |
| Cs <sup>137</sup> | 662,062                 | 0,851                       | 11020           | 9,1         | 885,76               | 12438,89            | 62,9                       | 8,46      | 0,00195                            |
| Co <sup>60</sup>  | 1173,775                | 0,99857                     | 1925,5          | 9,0         | 1758,98              | 11953,23            | 360,0                      | 5,91      | 0,00115                            |
|                   | 1333,085                | 0,99983                     |                 |             |                      | 10752,54            |                            |           | 0,00103                            |



Используя полученные данные, строим кривую эффективности.

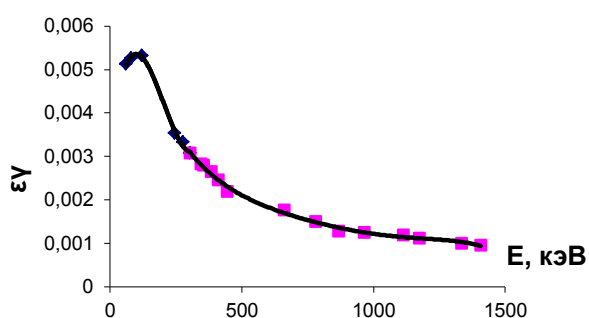


Рисунок 3 – Кривая эффективности ППД

По формуле аппроксимирующей кривой определяем эффективность регистрации четырех наиболее интенсивных линий ( $\epsilon$ ), для которых энергию ( $E$ ), выход ( $\mu$ ) взяли из экспериментальных данных [8].

Таблица 4 – Характеристики ожидаемых линий

| $E, \text{кэВ}$ | $\mu, \text{квант / деление}$ | $\epsilon, \text{импульс / квант}$ |
|-----------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 142,3           | 0,0368                        | 0,0069                             |
| 204,3           | 0,0408                        | 0,00658                            |
| 297,3           | 0,0297                        | 0,00368                            |
| 1279,8          | 0,0235                        | 0,00114                            |

Определяем плотность потока у поверхности образца:

$$\Phi = \frac{I}{4\pi R_1^2}, \text{ н / (см}^2\text{с)}$$

где  $R_1$  -расстояние между источником и образцом см,  $I$  - интенсивность источника нейтронов н/с.

Число запаздывающих  $\gamma$ -квантов, покинувших образец:

$$N = \Phi \cdot \mu \cdot \frac{m}{M} \cdot N_A \cdot \sigma = \Phi \cdot \mu \cdot S_{DM} \cdot t \cdot \frac{\rho}{M} \cdot N_A \cdot \sigma,$$

Здесь  $S_{DM} = \frac{\pi d^2}{4}$  – площадь образца ДМ см<sup>2</sup>,  $\mu$  - интенсивность линий квант/деление,  $m$  – масса образца г,  $M$  – молярная масса ДМ г/моль,  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$  – число Авогадро,  $\sigma$  –сечение деления ДМ барн [9].

Приняли число зарегистрированных детектором импульсов:

$$N_p = N \cdot \epsilon = 1 \text{ имп/с},$$

Выразим и найдем интенсивности источника  $I$  для разных образцов и геометрий:

$$I = \frac{N_p \cdot 4\pi R_1^2}{\mu \cdot \frac{m}{M} \cdot N_A \cdot \sigma \cdot \varepsilon} = \frac{N_p \cdot 4\pi R_1^2}{\mu \cdot S_{DM} \cdot t \cdot \frac{\rho}{M} \cdot N_A \cdot \sigma \cdot \varepsilon}$$

В результате определили, что наибольшую интенсивность источника надо иметь при наименьшем сечении деления, что соответствует энергии 2 МэВ, большем расстоянии источника до слоя ДМ и меньшим выходом  $\gamma$  – квантов на деление.

Таблица 5 – Рассчитанные характеристики источника нейтронов

|                                 | Тепловыми нейтронами | Спектр деления       |
|---------------------------------|----------------------|----------------------|
| I, н/с (R=100см)                | $1,35 \cdot 10^{13}$ | $6,57 \cdot 10^{15}$ |
| $\Phi$ , н/(с*см <sup>2</sup> ) | $1,1 \cdot 10^8$     | $5,2 \cdot 10^{10}$  |

Рассчитав плотность потока нейтронов, необходимую для проектирования источника нейтронов, выбираем прототипом реактор ИР, имеющий максимальную плотность потока тепловых нейтронов в АЗ  $1,5 \cdot 10^{14} \text{ н}/(\text{см}^2 \text{с})$ , быстрых  $5,7 \cdot 10^{13} \text{ н}/(\text{см}^2 \text{с})$  [3].

#### 4. ПОДГОТОВКА ПАРАМЕТРОВ К РАСЧЕТУ РЕАКТОРА ИР-8

##### 4.1. Определение объемных долей компонентов АЗ реактора типа ИР-8

Все габариты аз принимаем по прототипу (таблица А.1):

число рядов  $N_{\text{ряд}} = 4$ ,

размер стороны ТВС:  $a_1 = 0,0694\text{м}$ ,

размер ТВС с учетом дистанционирующих выступов:  $a_{\text{кл}} = 0,0715\text{м}$ ,

Число твэл в одной ТВС:  $N_{\text{твэл}} = 6\text{шт.}$

Выбираем элементарной ячейкой – ТВС, макроячейкой – АЗ.

Расчет объемов в нашей работе будем вести на 1 см высоты, поэтому рассчитываемые объемы будут пропорциональны площадям и измеряться в  $\text{см}^2$ . Объем АЗ на 1 см высоты:

$$V_0 = a_0^2 = 28,6^2 = 818 \text{ см}^2;$$

$a_0 = 4 \cdot a_{\text{кл}} = 4 \cdot 0,0715 = 0,286 \text{ м}$ , – длина стороны АЗ с учетом водного зазора.

Определим размеры для шеститрубной ТВС ИРТ 3М -ТВС с коаксиальными трубчатыми твэлами квадратного сечения с закругленными краями рис.4.

Размер под ключ ТВС:

$$S_{\text{ключ}} = a_1^2 - (2r_1)^2 + \pi r_1^2 = a_1^2 + (\pi - 4) \cdot r_1^2 = 6,94^2 - 0,86 \cdot 0,44^2 = 48 \text{ см}^2.$$

где:

$a_1 = 6,94 \text{ см}$  – размер стороны ТВС,

$r_1 = 0,44 \text{ см}$  – радиус закругления внешней оболочки.

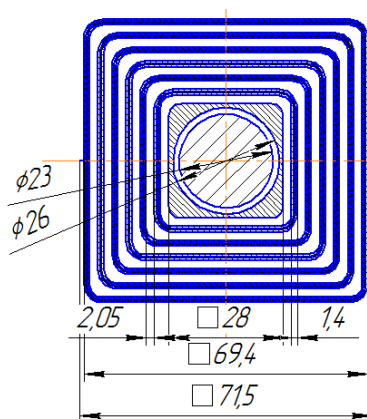


Рисунок 4 - Поперечное сечение ТВС ИРТ-3М с вытеснителем

1) Объем ТВС с водяным зазором:

$$V_{\text{ТВС}} = (a_{\text{кл}})^2 = 7,15^2 = 51,12 \text{ см}^2;$$

$$V_{\text{ТВС}} = V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{зоп}} + V_{\text{KM}}, \text{ см}^2$$

2) Объем горючего:

$$V_{\text{зоп}} = S_2 - S_3 + S_6 - S_7 + S_{10} - S_{11} + S_{14} - S_{15} + S_{18} - S_{19} + S_{22} - S_{23}.$$

$$S_i = a_i^2 + (\pi - 4) \cdot r_i^2 = a_i^2 - 0,86 \cdot r_i^2,$$

$$a_2 = a_1 - 2 \cdot \delta_{\text{об}} = 6,94 - 2 \cdot 0,05 = 6,84 \text{ см},$$

$$a_3 = a_2 - 2 \cdot \delta_{\text{ТВЭЛ}} = 6,84 - 2 \cdot 0,04 = 6,76 \text{ см и т.д.}$$

$$V_{\text{зоп}} = 6 \cdot 0,86 \cdot (0,35^2 - 0,39^2) + 6,84^2 - 6,76^2 + 6,15^2 - 6,06^2 + 5,46^2 - 5,38^2 + 4,76^2 - 4,69^2 + 4,08^2 - 4,0^2 + 3,39^2 - 3,31^2 = 4,72 \text{ см}^2;$$

$$V_{\text{зоп}} = 4,72 \text{ см}^2;$$

3) Объем оболочек ТВЭЛов:

$$V_{\text{об.тв}} = (S_1 - S_2 + S_3 - S_4) + (S_5 - S_6 + S_7 - S_8) + (S_9 - S_{10} + S_{11} - S_{12}) + (S_{13} - S_{14} + S_{15} - S_{16}) + (S_{17} - S_{18} + S_{19} - S_{20}) + (S_{21} - S_{22} + S_{23} - S_{24});$$

$$V_{\text{об.тв}} = 48 - 46,66 + 45,6 - 44,28 + 38,9 - 37,69 + 36,74 - 35,56 + 30,75 - 29,68 + 28,84 - 27,80 + 23,55 - 22,62 + 21,89 - 20,99 + 17,31 - 16,52 + 15,9 - 15,13 + 12,04 - 11,36 + 10,85 - 10,23 = 11,8 \text{ см}^2;$$

$$V_{\text{об.тв}} = 11,8 \text{ см}^2;$$

4) Объем А1 вытеснителя:

$$V_{\text{выт}} = a_{\text{выт}}^2 - 0,86 \cdot r_{\text{выт}}^2 - \frac{\pi d_{\text{о.выт}}^2}{4} + \frac{\pi d_{\text{1.выт}}^2}{4} = 2,8^2 - 0,86 \cdot 0,28^2 - \frac{3,14 \cdot 2,6^2}{4} + \frac{3,14 \cdot 2,3^2}{4} = 6,62 \text{ см}^2;$$

$$a_{\text{выт}} = 2,8 \text{ см} - \text{сторона А1 вытеснителя},$$

$$d_{\text{о.выт}} = 2,6 \text{ см} - \text{диаметр отверстия в вытеснителе},$$

$$r_{\text{выт}} = 0,28 \text{ см} - \text{радиус закругления вытеснителя};$$

$$d_{\text{1.выт}} = 2,3 \text{ см} - \text{диаметр стержня вытеснителя},$$

$$V_{\text{KM}} = V_{\text{об.тв}} + V_{\text{выт}} = 11,8 + 6,62 = 18,42 \text{ см}^2;$$

5) Объем воды:

$$V_{\text{вод}} = V_0 - V_{\text{KM}} - V_{\text{зоп}} = 51,12 - 18,42 - 4,72 = 27,98 \text{ см}^2;$$

Находим общий объем воды и горючего в АЗ:

$$V_{\text{вод.аз}} = N_{\text{ТВС}} \cdot V_{\text{вод}} = 16 \cdot 27,98 = 447,42 \text{ см}^2;$$

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 28   |

$$V_{\text{гор.аз}} = N_{TBC} \cdot V_{\text{гор}} = 16 \cdot 4,72 = 75,52 \text{ см}^3;$$

$$V_{\text{Al}} = N_{TBC} \cdot V_{\text{KM}} = 16 \cdot 18,42 = 294,7 \text{ см}^3;$$

Эквивалентные объемы отнесенные к одной ТВС:

$$V_{\text{ЗМ.ЭЯ}} = V_{\text{вод}} + V_{\text{Al}} = 27,98 + 18,42 = 46,40 \text{ см}^3;$$

$$V_{\text{БЛ.ЭЯ}} = V_{\text{гор}} = 4,72 \text{ см}^3;$$

$$V_{\text{ЭЯ}} = V_{\text{БЛ.ЭЯ}} + V_{\text{ЗМ.ЭЯ}} = 4,72 + 46,40 = 51,12 \text{ см}^3.$$

Погрешность определения объема элементарной ячейки:

$$\Delta V = \frac{V_{\text{ЭЯ}} - V_{TBC}}{V_{\text{ЭЯ}}} \cdot 100 = \frac{51,12 - 51,12}{51,12} \cdot 100 = 0\% . \text{ Расчет верен.}$$

Определение размеров эквивалентной ячейки:

$$d_{\text{бл}} = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{\text{БЛ.ЭЯ}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,72}{\pi}} = 2,452, \text{ см.}$$

$$d_{\text{ЭЯ}} = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{\text{ЭЯ}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 51,12}{\pi}} = 8,07, \text{ см.}$$

Доля воды в реакторе:

$$\frac{V_{\text{вод}}}{V_{\text{ЭЯ}}} = \frac{27,98}{51,12} = 0,547.$$

#### 4.2. Определение расхода теплоносителя

Для определения энтальпии на выходе из реактора, принимаем суммарные потери давления в пределах активной зоны, ориентируясь на прототип [2].

$$P_{\text{вх}} = 0,19 \cdot 10^3 \text{ кПа},$$

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} + \Delta P_{\text{нив}} - \Delta \bar{P} = 0,19 \cdot 10^3 + 5,62 - 24 = 0,17 \cdot 10^3 \text{ кПа},$$

$$\Delta P_{\text{нив}} = \rho g H_0 = 988 \cdot 9,8 \cdot 0,58 = 5,62 \text{ кПа},$$

$$\Delta \bar{P} = 24 \text{ кПа}.$$

Находим энтальпию воды на входе и выходе из а.з.:

$$h_{\text{вх}} = f(P_{\text{вх}}, T_{\text{вх}}) = f(0,19 \text{ МПа}, 47,5^\circ \text{C}) = 199 \text{ кДж/кг};$$

$$h_{\text{вых}} = f(P_{\text{вых}}, T_{\text{вых}}) = f(0,17 \text{ МПа}, 54,5^\circ \text{C}) = 228 \text{ кДж/кг}.$$

Средняя температура и давление теплоносителя равна:

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 29   |

$$T_{cp} = \frac{T_{BX} + T_{BbIX}}{2} = \frac{47,5 + 54,5}{2} = 51^{\circ}C.$$

$$P_{cp} = \frac{P_{BX} + P_{BbIX}}{2} = \frac{0,19 + 0,17}{2} = 0,18 \text{ МПа.}$$

Средняя плотность теплоносителя:

$$\bar{\gamma} = f(\bar{P}, T_{cp}) = 988 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Расход теплоносителя через аз и отражатель равен:

$$G_p = \frac{Q}{(h_{bIX} - h_{BX})} = \frac{8000}{(228 - 199)} = 275,9 \text{ кг/с,}$$

$$G_p = G_{аз} + G_{зм},$$

Зазоры между бериллиевыми блоками заполнены водой [2]:

$$S_{в.зм} = N_{B.бл} \cdot (a_{кл}^2 - a_1^2) - (a_0^2 - (a_0 - 2 \cdot a_{TBC})^2),$$

$$S_{в.зм} = 38 \cdot (0,0715^2 - 0,0694^2) - [0,286^2 - (0,286 - 2 \cdot 0,00105)^2] = 0,01 \text{ м}^2,$$

$$S_{в.аз} = V_{вод.аз} \text{ на } 1 \text{ см} = 447,74 \text{ см}^2 = 0,044774 \text{ м}^2$$

$$S_{в.зм} = \frac{0,01}{0,044774} \cdot S_{в.аз} = 0,223 \cdot S_{в.аз},$$

$$G_{зм} = 0,223 \cdot G_{аз},$$

$$G_p = G_{аз} + 0,223 \cdot G_{аз} = 1,223 \cdot G_{аз},$$

Расход через аз:

$$G_{аз} = \frac{G_p}{1,223} = \frac{275,9}{1,223} = 225,56 \text{ кг/с}$$

$$G_{TBC} = \frac{G_{аз}}{N_{TBC}} = \frac{225,56}{16} = 14 \frac{\text{кг}}{\text{с}},$$

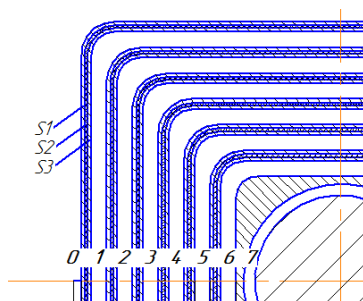


Рисунок 5 - К расчету расхода и скорости в зазорах между ТВЭлами

Расход по параллельным зазорам между ТВЭлами распределяется обратно пропорционально коэффициентам гидравлического сопротивления сети:

$$\frac{G_{зз1}}{G_{зз2}} = \sqrt{\frac{k_2}{k_1}},$$

$$k_{ззi} = \xi_{mp} \cdot \frac{H_0}{2 \cdot d_{zi} \cdot \gamma \cdot S_{мо.ззi}} = \frac{H_0}{2 \cdot d_{zi} \cdot \gamma \cdot \Pi_{ззi} \cdot H_0} = \frac{1}{2 \cdot d_{zi} \cdot \gamma \cdot \Pi_{ззi}},$$

$$S_{мо.ззi} = \Pi_{ззi} \cdot H_0$$

Подставим в уравнение для потерь:

$$\frac{G_{зз1}}{G_{зз2}} = \sqrt{\frac{d_{z1}}{d_{z2}} \cdot \frac{\Pi_{зз1}}{\Pi_{зз2}}},$$

Гидравлический диаметр зазоров:

$$d_{\Gamma i} = \frac{4S_{ззi}}{\Pi_{ззi}},$$

Площадь сечения зазора:

$$S_{1.зз} = S_4 - S_5$$

$$S_i = a_i^2 + (\pi - 4) \cdot r_i^2 = a_i^2 - 0,86 \cdot r_i^2,$$

$$a_2 = a_1 - 2 \cdot \delta_{об} = 0,694 - 2 \cdot 0,005 = 0,684 \text{ см},$$

$$a_3 = a_2 - 2 \cdot \delta_{ТВЭЛ} = 0,684 - 2 \cdot 0,004 = 0,676 \text{ см и т.д.}$$

Периметр зазора:

$$\Pi_{1.зз} = \Pi_4 - \Pi_5,$$

$\Pi_i = 4a_i + 2\pi r_i - 8r_i$  – периметр квадрата с закругленными краями радиусом  $r$ .

Таблица 6 – К определению скоростей ТН в зазорах ТВС

| Номер зазора | Сечение зазора, $S_{i.зз}, \text{мм}^2$ | Периметр зазора, $\Pi_{i.зз}, \text{мм}$ | Гидравлический диаметр зазора $d_{z1}, \text{мм}$ | Расход воды через зазор $G_{ззi}, \text{кг/с}$ | Скорость воды в зазоре $\omega_i, \text{м/с}$ |
|--------------|---|--|---|--|---|
| 0            | 617,3                                   | 564,43                                   | 4,4   | 2,27   | 3,7   |
| 1            | 538,2                                   | 503,67                                   | 4,3   | 2,12   | 4,0   |
| 2            | 481,6                                   | 448,47                                   | 4,3   | 2,01   | 4,2   |
| 3            | 425,1                                   | 393,27                                   | 4,3   | 1,88   | 4,5   |
| 4            | 368,5                                   | 338,07                                   | 4,4   | 1,76   | 4,8   |
| 5            | 311,9                                   | 282,87                                   | 4,4   | 1,61   | 5,2   |
| 6            | 245,4                                   | 230,42                                   | 4,3   | 1,44   | 5,9   |
| 7            | 115,4                                   | 153,86                                   | 3,0   | 0,98   | 8,6   |

## 5. ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ АЗ РЕАКТОРА ИР-8

### 5.1. Вычисление тепловых потоков максимально и средне напряженной ТВС

Средний тепловой поток с поверхности твэлов:

$$\bar{q}_f = \frac{K_3 \cdot Q}{S_{TO}} = \frac{0,94 \cdot 8000}{21,9} = 343,4 \frac{\kappa Bm}{m^2}.$$

$S_{TO} = \Pi_{TO} \cdot H_0 \cdot N_{TBC} = 2,36 \cdot 0,58 \cdot 16 = 21,9 m^2$  – теплопередающая поверхность твэлов

в одной ТВС,

$\Pi = 4a + 2\pi r - 8r$  – периметр квадрата с закругленными краями радиусом  $r$ ,

$$\begin{aligned} \Pi_{TO} &= 4 \cdot (a_1 + a_4 + a_5 + a_8 + a_9 + a_{12} + a_{13} + a_{16} + a_{17} + a_{20} + a_{21} + a_{24}) - 10,32 \cdot (r_1 + r_4) = \\ &= 4 \cdot 10^{-3} \cdot (69,4 + 66,6 + 62,5 + 59,7 + 55,6 + 52,8 + 48,7 + 45,9 + 41,8 + 39 + 34,9 + 32,1) - \\ &= 10,32 \cdot 10^{-3} \cdot (4,4 + 3) = 2,36 m \end{aligned}$$

обогреваемый периметр твэлов в ТВС,

$K_3 = 0,94$  – коэффициент, для учета тепловыделения в отражателе и конструкционных материалах.

Максимальный тепловой поток с единицы поверхности:

$$q_f^{\max} = \bar{q}_f \cdot K_T \cdot K_z = 343,4 \cdot 1,7 \cdot 1,46 = 852,2 \frac{\kappa Bm}{m^2},$$

Принимаем  $K_z = 1,46$  – аксиальный коэффициент неравномерности в горячем канале,  $K_T = 1,7$  – коэффициент неравномерности тепловыделения по сечению в горячем канале [3].

В реакторах, охлаждаемых водой, с целью обеспечения надежной эксплуатации твэлов производится расчет критического теплового потока  $q^{\text{крит}}$ , который сравнивается со значениями  $q_f^{\max}$ . Критический тепловой поток [14]:

$$q^{\text{крит}} = 1510 \cdot (1 + 0,1198 \cdot \omega) \cdot (1 + 0,00914 \cdot \Delta T_{\text{тепл}}) (1 + 0,19P)$$

$$\omega = 5,3 m/c,$$

$$\Delta T_{\text{тепл}} = T_s - T_{\text{вых}} = 117 - 54,5 = 62,5^\circ C,$$

$$P = 1,8 \text{ бар}$$

$$q^{\text{крит}} = 1510 \cdot (1 + 0,1198 \cdot 5,3) \cdot (1 + 0,00914 \cdot 62,5) \cdot (1 + 0,19 \cdot 1,8) = 5191 \frac{\kappa Bm}{m^2},$$



Очевидно, что выполняется условие  $q^{крит} > q_f^{max}$ .

Проверяем на допустимые температуры ТВС с максимальным энерговыделением  $q_f^{max} = 852,2 \frac{кВт}{м^2}$ .

$\Pi_1 = 4a_1 + 2\pi r_1 - 8r_1 + 4a_4 + 2\pi r_4 - 8r_4$  – обогреваемый периметр первого от периферии твэла, и т.д

$$\Pi_1 = 0,531м, \quad \Pi_2 = 0,476м, \quad \Pi_3 = 0,421м, \quad \Pi_4 = 0,366м, \quad \Pi_5 = 0,310м, \quad \Pi_6 = 0,255м.$$

Определяем параметры теплоносителя по высоте канала в расчете на максимально напряженный твэл.

Разбиваем активную зону по высоте на 5...7 участков и для всех значений координаты  $z$  на границах участков определяем линейный тепловой поток, тепловую мощность, температуру теплоносителя [15]:

$$q_l(z) = q_{l0} \cdot \cos \frac{\pi \cdot z}{H_{эф}},$$

$$\text{где } q_{l0} = q_f^{max\ твэл} \cdot \Pi_1 = 852,2 \cdot 0,531 = 452,7 \frac{кВт}{м} - \text{линейный тепловой поток}$$

для максимально напряженного твэла, кВт/м.

$$Q_{твэл}(z) = \frac{q_{l0} \cdot H_{эф}}{\pi} \cdot \left[ \sin \left( \frac{\pi \cdot z}{H_{эф}} \right) + \sin \left( \frac{\pi \cdot H_0}{2 \cdot H_{эф}} \right) \right];$$

$$H_{эф} = H_0 + \delta_{эф} = 0,58 + 0,0124 = 0,592м.$$

$$t_{ми}^i(z) = t_{ми}^{i-1}(z) + \frac{4}{d_{\Gamma}} \frac{q_f^i H_0}{d_{\Gamma} \cdot \omega p \cdot c_p}$$

Здесь:  $\delta_{эф}$  – эффективная добавка, принимается, проверяется в нейтронно-физическом расчете

$$q_f^i = \frac{q_l^i}{\Pi_1}, \frac{кВт}{м^2} - \text{распределение плотности теплового потока по высоте.}$$

Гидравлический диаметр:

$$d_{\Gamma аз} = 0,00437 м.$$

$$\omega p = 3,7 \cdot 988 = 3656 - \text{массовая скорость теплоносителя, кг/м}^2\text{с}$$

$$c_p = 4241 \text{ Дж / кгС} - \text{удельная теплоемкость теплоносителя,}$$

$$\text{Показываем пример расчета для координаты } z = \frac{-H_{аз}}{2}$$

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 33   |

Результаты остальных вариантных расчетов заносим в таблицу 7.

$$q_l \left( \frac{-H_{az}}{2} \right) = 452,7 \cdot \cos \frac{\pi \cdot (-0,29)}{0,592} = 15,2 \frac{\kappa Bm}{m};$$

$$Q_{твэл} \left( \frac{-H_{аз}}{2} \right) = \frac{452,7 \cdot 0,592}{\pi} \cdot \left[ \sin \left( \frac{\pi \cdot (-0,29)}{0,592} \right) + \sin \left( \frac{\pi \cdot 0,58}{2 \cdot 0,592} \right) \right] = 0 \kappa Bm;$$

$$t_{mn}^1(z) = t_{mn}^{6x}(z) = 47,5^\circ C.$$

Таблица 7 - Параметры теплоносителя для максимально напряженного твэла по высоте канала

|                       | $\frac{-H_{аз}}{2}$ | $\frac{-H_{аз} \cdot 0,6}{2}$ | $\frac{-H_{аз} \cdot 0,3}{2}$ | 0     | $\frac{H_{аз} \cdot 0,3}{2}$ | $\frac{H_{аз} \cdot 0,6}{2}$ | $\frac{H_{аз}}{2}$ |
|-----------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| $q_l$                 | 15,2                | 273,5                         | 405,5                         | 452,7 | 405,5                        | 273,5                        | 15,2               |
| $Q_{твэл}, \kappa Bm$ | 0                   | 17,3                          | 47,4                          | 85,4  | 123,4                        | 153,4                        | 170,7              |
| $t_{mn}$              | 47,5                | 51,5                          | 57,5                          | 64,2  | 70,2                         | 74,2                         | 74,4               |

Так как  $t_{\max}(z) = 74,4 < t_s = 116^\circ C$  то кипения теплоносителя в активной зоне не будет.

Аналогично получим распределение температуры и энергии для твэла со средним энерговыделением.

Таблица 8 - Параметры теплоносителя для для твэла со средним энерговыделением

|                       | $\frac{-H_{аз}}{2}$ | $\frac{-H_{аз} \cdot 0,6}{2}$ | $\frac{-H_{аз} \cdot 0,3}{2}$ | 0     | $\frac{H_{аз} \cdot 0,3}{2}$ | $\frac{H_{аз} \cdot 0,6}{2}$ | $\frac{H_{аз}}{2}$ |
|-----------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| $q_l$                 | 4,9                 | 87,3                          | 129,4                         | 144,5 | 129,4                        | 87,3                         | 4,9                |
| $Q_{твэл}, \kappa Bm$ | 0,0                 | 5,5                           | 15,1                          | 27,2  | 39,4                         | 49,0                         | 54,5               |
| $t_{mn}$              | 47,5                | 48,9                          | 50,5                          | 52,3  | 53,9                         | 55,0                         | 55,0               |

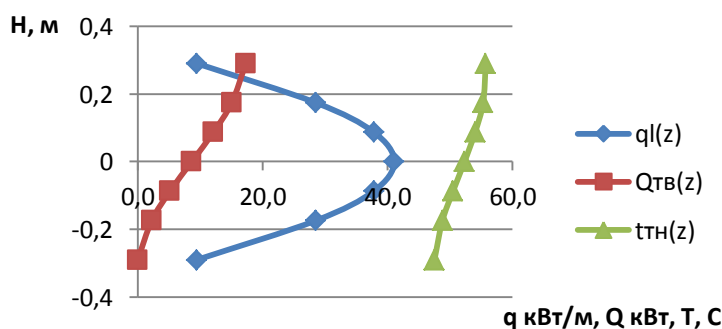


Рисунок 6 - Распределение тепловой нагрузки, температуры теплоносителя для средне напряженного твэла по высоте аз

## 5.2. Расчет эффективной температуры в твэле средней мощности

Коэффициент кинематической вязкости, число Прандтля и коэффициент теплопроводности определяем по давлению и средней температуре пограничного слоя, которая была найдена методом последовательных итераций:

$$\begin{aligned}\bar{T} &= \frac{T_{об} + \bar{T}_{тн}}{2} = \frac{72,9 + 51,3}{2} = 62,1^\circ\text{C}, \\ \nu_{жс} &= 4,6 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}; \\ \text{Pr}_{жс} &= 2,9; \\ \lambda_{жс} &= 0,65 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.\end{aligned}$$

Находим число Рейнольдса:

Гидравлический диаметр каналов для 1го от периферии твэла берем из таблицы 1.

$$\text{Расчет критериев производится на: } d_z = \frac{4S1}{\Pi1} = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

$$\text{Средняя скорость 0 и 1 зазора : } \omega = \frac{4,0 + 3,7}{2} = 3,9 \text{ м/с.}$$

$$\text{Re}_{жс} = \frac{\omega \cdot d_z}{\nu_{жс}} = \frac{3,9 \cdot 2,8 \cdot 10^{-3}}{4,6 \cdot 10^{-7}} = 2,37 \cdot 10^4.$$

Определяем  $Nu$  для двустороннего обогрева [13]. Т.к. твэл тонкий, то считаем, что поток тепла одинаков с обеих сторон твэла.

При этом:

$$Nu_1 = Nu_2 \approx 0,95 Nu_0 = 0,95 \cdot 111,5 = 106,$$

$$Nu_0 = 0,023 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4} = 0,023 \cdot (2,37 \cdot 10^4)^{0,8} 2,9^{0,43} = 111,5,$$

Где,  $Nu_0$  - число Нуссельта для круглой трубы рассчитывается по гидравлическому диаметру  $d_z$ .

Находим коэффициенты теплоотдачи:

$$\begin{aligned}Nu &= \frac{\alpha \cdot d_{газ}}{\lambda_{жс}}, \\ \alpha_1 &= \frac{Nu \cdot \lambda_{жс}}{d_{г2}} = \frac{106 \cdot 0,65}{0,0043} = 16,0 \text{ к} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}, \\ \alpha_2 &= \frac{Nu_2 \cdot \lambda_{жс}}{d_{г3}} = \frac{106 \cdot 0,65}{0,00432} = 15,9 \text{ к} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}.\end{aligned}$$

Выбираем наименьший коэффициент, т.к. при этом теплоперепад максимален:

$$\alpha = 15,9 \text{ К} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}.$$

Максимальный температурный напор стенка – жидкость:

$$\Delta T_{\alpha}^{\max} = \frac{\bar{q}_f}{\alpha} = \frac{343,3}{15,9} = 21,6 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Максимальная температура стенки твэла [9]:

$$T_{\text{об.нар}} = T_{\text{вх}} + \frac{\Delta T_T}{2} + \Delta T_{\alpha}^{\max} = 47,5 + \frac{(55 - 47,5)}{2} + 21,6 = 72,8 \text{ }^{\circ}\text{C}, \text{ где}$$

$\Delta T_T$  – максимальная разница температур теплоносителя на выходе и входе а.з.

Перепад температуры по оболочке твэла:

$$\Delta T_{\text{об}} = \bar{q}_f \cdot \frac{\delta_{\text{об}}}{\lambda_{\text{об}}} = 343,4 \cdot \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{0,166} = 1 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$T_{\text{об.нар}} = 72,8 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$T_{\text{об.вн}} = T_{\text{об.нар}} + \Delta T_{\text{об}} = 72,8 + 1 = 73,8$$

$$\bar{T}_{\text{об}} = \frac{T_{\text{об.вн}} + T_{\text{об.нар}}}{2} = 73,3$$

$\lambda_{\text{об}} = 0,166 \text{ кВт} / \text{мК}$ , – коэффициент теплопроводности оболочки, рассчитан итерационно, используя график зависимости от температуры, где  $\lambda_0 = 0,173 \text{ кВт} / \text{мК}$ , – коэффициент теплопроводности исследуемого образца при температуре 298 К, рис 8. [10].

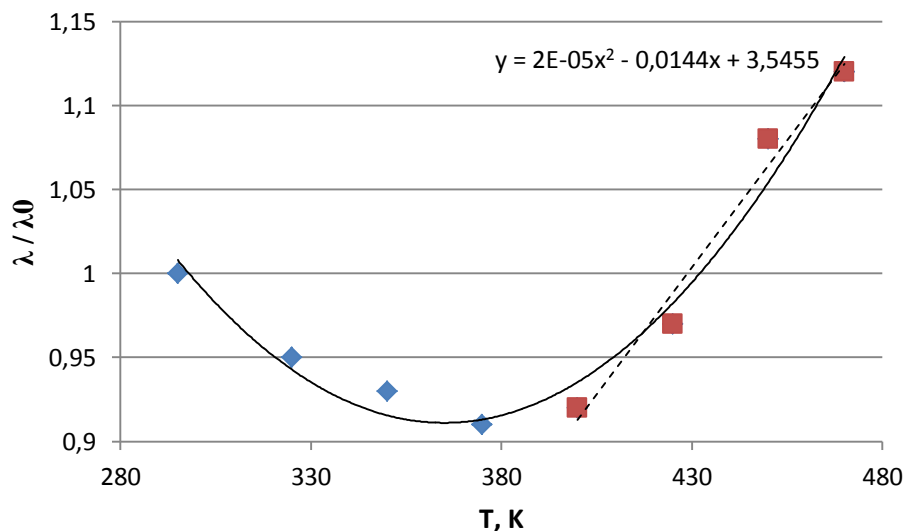


Рисунок 7 – Зависимость теплопроводности сплава САВ-1 от температуры [10]

Перепад температуры в топливном сердечнике:

Коэффициент теплопроводности горючей смеси рассчитываем по формуле Оделевого [11]:

$$\frac{\lambda_{ГОР}}{\lambda_1} = 1 - \frac{m_2}{\frac{1}{1-\nu} - \frac{1-m_2}{3}} = 1 - \frac{0,79}{\frac{1}{1-23,37} - \frac{1-0,79}{3}} = 7,887;$$

$$\nu = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{165,54}{7,085} = 23,37,$$

$$\lambda_{ГОР} = \lambda_1 \cdot 7,887 = 7,085 \cdot 7,887 = 55,88 \text{ Вт} / \text{м}^2 \text{С} = 0,05588 \text{ кВт} / \text{м}^2 \text{С}.$$

$\lambda_2 = 165,54 \text{ Вт} / \text{м}^2 \text{С}$  - теплопроводность алюминиевого сплава при средней температуре топлива в составе смеси, определена по графику рис.7.

$$\lambda_1 = \frac{100}{7,5408 + 17,692 \cdot T/1000 + 3,6142 \cdot (T/1000)^2} + \frac{6400}{(T/1000)^{5/2}} \cdot \exp\left(\frac{-16,35}{T/1000}\right) = 7,085 \text{ Вт} / \text{м}^2 \text{С},$$

$$T = 74 + 273 = 347 \text{ К},$$

-теплопроводность диоксида урана 95% при средней температуре топлива [12].

$m_2 = 0,79$  - объемная доля включений алюминиевого сплава, входящего в смесь [22];

Перепад температуры в сердечнике:

$$\Delta T_{гор} = \frac{\bar{q}_f \cdot \delta_c}{2\lambda_{ГОР}} = \frac{343,4 \cdot 0,0004}{2 \cdot 0,05588} = 1,23 \text{ } ^\circ\text{С},$$

Температура топлива:

$$T_{ГОР} = T_{ВХ} + \frac{\Delta T_T}{2} + \Delta T_\alpha + \Delta T_{об} + \Delta T_{гор} = 47,5 + 3,75 + 21,6 + 1 + 1,23 = 75,1 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

Эффективная температура топлива [19]:

$$T_{ГОР}^{эф} = T_{об.нар} + 0,4 \cdot (T_{ГОР} - T_{об.нар}) = 72,8 + 0,4 \cdot (75,1 - 72,8) = 73,7 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

## 6. НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РЕАКТОРА

### 6.1. Определение ядерных плотностей нуклидов

Горючее  $UO_2$  в алюминиевой матрице и замедлитель-теплоноситель ( $H_2O$ ) разобьем на отдельные компоненты, для которых и будем считать ядерные и молекулярные плотности. Расчеты ядерных и молекулярных плотностей ведем по формуле [18]:

$$N_i(N_{ij}) = \frac{N_A \cdot \gamma_i(\gamma_{ij})}{A_i(M_{ij})}, \text{ (ядер/см}^3\text{) или (моль/см}^3\text{),}$$

где  $\gamma_i(\gamma_{ij})$  – ядерная и молекулярная плотности отдельных нуклидов;

$N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$  – число Авогадро;

$A_i, M_{ij}$  – атомный и молекулярный вес.

Молекулярный вес для топлива определяем с учетом обогащения по делящемуся изотопу  $c_5$  %. Для двуокиси урана имеем:

$$M_{UO_2} = \left( \frac{C_5}{100} \right) \cdot A_{U5} + \left( \frac{100 - C_5}{100} \right) \cdot A_{U8} + 2 \cdot A_O;$$

$$M_{UO_2} = \left( \frac{90}{100} \right) \cdot 235 + \left( \frac{100 - 90}{100} \right) \cdot 238 + 2 \cdot 16 = 267,3 \text{ а.е.м.};$$

$$N_{Al.zop} = \frac{N_A \cdot \gamma_{Al.zop}}{M_{Al}} = \frac{6,022 \cdot 10^{23} \cdot 2,7}{27} = 6,022 \cdot 10^{22} \text{ моль / см}^{-3};$$

$$m_{Al.zop} = \gamma_{Al.zop} \cdot H_0 \cdot S_{zop.TBC} = 2,7 \cdot 58 \cdot 4,72 = 739,15 \text{ г};$$

$$\gamma_{U5} = \frac{m_{U5}}{H_0 \cdot S_{zop.TBC}} = \frac{265}{58 \cdot 4,72} = 0,968 \text{ г / см}^3,$$

$$N_{U5} = \frac{N_A \cdot \gamma_{U5}}{M_{UO_2}} = \frac{6,022 \cdot 10^{23} \cdot 0,968}{267,3} = 2,181 \cdot 10^{21} \text{ моль / см}^3,$$

$$N_{U5} = 0,9 \cdot N_{UO_2};$$

$$N_{UO_2} = \frac{N_{U5}}{0,9} = \frac{2,181 \cdot 10^{21}}{0,9} = 2,423 \cdot 10^{21} \text{ моль / см}^3,$$

$$\gamma_{UO_2} = \frac{N_{UO_2} \cdot M_{UO_2}}{N_A} = 1,076 \text{ г / см}^3,$$

$$m_{UO_2} = \gamma_{UO_2} \cdot H_0 \cdot S_{zop.TBC} = 1,076 \cdot 58 \cdot 4,72 = 294,4 \text{ г};$$

$$N_{U8} = 0,1 \cdot N_{UO_2} = 0,1 \cdot 2,423 \cdot 10^{21} = 2,423 \cdot 10^{20} \text{ моль / см}^3,$$

$$N_O^T = 2 \cdot N_{UO_2} = 2 \cdot 2,423 \cdot 10^{21} = 4,846 \cdot 10^{21} \text{ моль / см}^3;$$

$$N_{Al} = \frac{N_A \cdot \gamma_{Al}}{A_{Al}} = \frac{6,022 \cdot 10^{23} \cdot 2,7}{27} = 6,022 \cdot 10^{22} \text{ моль} / \text{см}^{-3};$$

Плотность воды  $\gamma_{H_2O} = 0,988 \text{ г} / \text{см}^3$ .

$$N_{H_2O} = \frac{N_A \cdot \gamma_{H_2O}}{A_{H_2O}} = \frac{6,022 \cdot 10^{23} \cdot 0,988}{18} = 3,305 \cdot 10^{22} \text{ моль} / \text{см}^{-3};$$

$$N_H = 2 \cdot N_{H_2O} = 6,61 \cdot 10^{22} \text{ моль} / \text{см}^{-3};$$

$$N_O = N_{H_2O} = 3,3 \cdot 10^{22} (\text{см}^{-3}).$$

Находим значения средних логарифмических декрементов  $\xi$ , микроскопических сечений рассеяния  $\sigma_s$  при энергии нейтронов  $E=1$  эв ( $u=14,5$ ), микроскопических сечений поглощения  $\sigma_a$  при энергии нейтронов  $E=0,0253$  эв, из [16,17] и заносим их в таблицу 9.

$$\xi_{Al} = \frac{2}{27 + \frac{2}{3}} = 0,0723 \quad ; \quad \xi_{U5} = \frac{2}{235 + \frac{2}{3}} = 0,0085 \quad ; \quad \xi_{U8} = \frac{2}{238 + \frac{2}{3}} = 0,0084 \quad ;$$

$$\xi_O = \frac{2}{16 + \frac{2}{3}} = 0,120 \quad , \quad \xi_{H_2O} = \frac{2\sigma_s^H + \xi_O \cdot \sigma_s^O}{\sigma_s^{H_2O}} = \frac{2 \cdot 20,4 + 0,121 \cdot 3,76}{44,56} = 0,926$$

Таблица 9 – Эффективные микроскопические сечения для элементарной ячейки

| Элемент           | $V$ ,<br>$\text{см}^2$ | $N_i \cdot 10^{-24}$ ,<br>ядер / $\text{см}^3$ | $\sigma_a$ ,<br>барн | $\sigma_s$ ,<br>барн | $\xi$  | $\xi \sigma_s$ ,<br>барн | $V N \sigma_a$ ,<br>см | $V N \sigma_s \xi$ ,<br>см |
|-------------------|------------------------|--|----------------------|----------------------|--------|--------------------------|------------------------|----------------------------|
| U <sup>5</sup>    | 4,72                   | 0,002181                                       | 680,9                | 10                   | 0,0085 | 0,085                    | 7,0094                 | 0,00088                    |
| U <sup>8</sup>    | 4,72                   | 0,0002423                                      | 2,71                 | 8,9                  | 0,0084 | 0,07476                  | 0,0031                 | 0,00009                    |
| Al <sub>гор</sub> | 4,72                   | 0,06022  | 0,23                 | 1,4                  | 0,0723 | 0,101                    | 0,0654                 | 0,029                      |
| O                 | 4,72                   | 0,004846                                       | 0,00027              | 3,76                 | 0,12   | 0,4512                   | 0,0000                 | 0,01032                    |
| Al                | 18,42                  | 0,06022  | 0,23                 | 1,4                  | 0,0723 | 0,10122                  | 0,2551                 | 0,112                      |
| H <sub>2</sub> O  | 27,98                  | 0,03305  | 0,66                 | 44,56                | 0,926  | 41,26256                 | 0,6103                 | 38,157                     |

## 6.2. Определение средней температуры нейтронного газа по ячейке

Введение температуры нейтронного газа  $T_{нг}$  позволяет учесть реальное поглощение и утечку тепловых нейтронов в реакторе и сохранить допущение о распределении нейтронов по скоростям, близким максвелловскому [18].

Температуру нейтронного газа определяем по формуле для водородсодержащих сред:

$$T_{нз} = T_0 \cdot \left[ 1 + C \cdot \left( \frac{\Sigma_a(T_0)}{\xi \Sigma_s(1)} \right) \right],$$

где  $T_0$  – средняя температура по элементарной ячейке замедлителя;

$\Sigma_a(T_0)$  – макроскопическое сечение поглощения гомогенизированной по элементарной ячейки, скорректированной на температуру среды;

$\xi \Sigma_s(1)$  – замедляющая способность;

$C=1,7$  – эмпирическая константа (для водо-водяного реактора).

$T_0 = 20^\circ \text{C} = 293 \text{ K}$ .

$$\Sigma_a(T_0) = \sum_{j=1} \frac{(VN\sigma_a(0,0253))}{V_{TBC}} \cdot \sqrt{\frac{293,6}{T_0}} = \frac{7,9233}{51,12} \cdot \sqrt{\frac{293,6}{293}} = 0,156 \text{ , см}^{-1};$$

$$\xi \Sigma_s(1) = \sum_{j=1} \frac{(VN\xi\sigma_s(1))}{V_0} = \frac{38,309}{51,12} = 0,749 \text{ , см}^{-1};$$

Вычисляем температуру нейтронного газа:

$$T_{нз} = 293 \cdot \left[ 1 + 1,7 \cdot \frac{0,156}{0,749} \right] = 396,4 \text{ , К. или } T_{нз} = 123 \text{ , } ^\circ\text{C}.$$

Для проверки полученной температуры  $T_{нз}$  и анализа результата воспользуемся следующим соотношением:

$$\frac{T_{нз} - T_{cp}}{T_{cp}} = 0,1 \div 0,3; ;$$

$$\frac{T_{нз} - T_{cp}}{T_{cp}} = \frac{123 - 20}{20} = 5.$$

Соотношение не выполнилось. Поэтому спектр нейтронов в замедлителе будет ужесточаться.

Окончательно округлим температуру нейтронного газа до:  $T_{нз} = 400, \text{K}$ .

### 6.3. Определение энергии сшивки между спектрами замедляющихся и тепловых нейтронов

Точка пересечения спектров Ферми  $\Phi_\phi$  и Максвелла  $\Phi_M$ , введена как  $E_{ГР}$  для реактора на тепловых и не очень жёстких промежуточных нейтронах, условно определяет верхнюю границу тепловой группы. Условие равенства потоков:  $\Phi_\phi(E_{ГР}) = \Phi_M(E_{ГР})$ , приводит к трансцендентному уравнению [18]:



$$f = \frac{x^2 \cdot e^{-x}}{1 - (1+x) \cdot e^{-x}} = \frac{\sum_a(E_{zp}, E_m)}{\xi \sum_s(1)},$$

Задаёмся значением  $x_{ГР}$  в пределах  $3 \div 10$ , составим для левой части уравнения табл. 10.

Таблица 10 - Значения функции  $f_{лев}$  в зависимости от  $x_{ГР}$

| $x_{ГР}$  | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $f_{лев}$ | 0,5595 | 0,3226 | 0,1755 | 0,0908 | 0,0450 | 0,0215 | 0,0100 | 0,0045 |

Задаёмся значением  $x_{ГР}$ , после чего решаем правую часть уравнения.

Определим сечение поглощения гомогенной среды, усреднённое по спектру Максвелла с учетом нуклидов, подчиняющихся и не подчиняющихся закону  $1/\nu$ :

$$\sum_a(E_{zp}, E_m) = \frac{1}{V_{TBC}} \cdot \left( \sum_i V_i \cdot N_i \cdot \overline{\sigma}_a^i(E_{zp}, E_T) + V \cdot N \cdot \overline{\sigma}_a^5(E_{zp}, E_T) \right),$$

где  $\overline{\sigma}_a^i(E_{zp}, E_T)$  - сечение поглощения отдельных элементов, усреднённые по спектру Максвелла.

В зависимости от характера изменения  $\sigma_i(E)$  от энергии различают два случая: 1. случай выполнения закона  $1/\nu$ ;

2. случай невыполнения закона  $1/\nu$ .

### 1) Случай выполнения закона $1/\nu$

Для  $U^8$ , Al,  $H_2O$  находим по формуле:

$$\overline{\sigma}_a^i(E) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \sigma_{a0}^i \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{H_2}}} \cdot F(x) = \sigma_{a0}^i \cdot K(x),$$

где  $K(x)$  – поправочный коэффициент  $K(x) = \sqrt{\frac{293}{T_{H_2}}} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot F(x)$ ,

$$F(x_{zp}) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^{x_{zp}} \frac{\sqrt{x} \cdot \exp(-x) dx}{1 - (1+x) \cdot \exp(-x)}.$$

$F(x_{zp})$  находим по аппроксимационной формуле

$$F(x) = 0,8779 \cdot x^{-1} + 0,01471 \cdot x + 0,7735.$$

Таблица 11 - Значения функции  $F(x_{zp})$  в зависимости от  $x_{ГР}$

| $x_{ГР}$    | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $F(x_{zp})$ | 1,11026 | 1,05182 | 1,02263 | 1,00808 | 1,00188 | 1,00092 | 1,00343 | 1,00839 |

## 2) Случай невыполнения закона $1/\nu$

Для  $U_5$  необходимо учесть, что  $\sigma_a$  и  $\sigma_f$  заметно отклоняются от закона  $1/\nu$ , поэтому необходимо применить дополнительный множитель ( $g_i$  - фактор), являющийся функцией от  $T_{нг}$ . При  $T_{нг} = 400 \text{ K}$  находим  $g_i$  - факторы из [18]:

$$g_a = 0,9526; \quad g_f = 0,9512;$$

$$\bar{\sigma}_{a5} = K(x) \cdot \sigma_{a5} \cdot g_{a5};$$

$$\bar{\sigma}_{f5} = K(x) \cdot \sigma_{f5} \cdot g_{f5}.$$

Ниже приведем пример расчета для одного значения,  $x=3$ , а все остальные данные расчета занесем в таблицу 5.

$$F(3) = 0,8779 \cdot 3^{-1} + 0,01471 \cdot 3 + 0,7735 = 1,11026,$$

$$K(3) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \sqrt{\frac{293}{400}} \cdot 1,11026 = 0,8419;$$

$$\bar{\sigma}_a^5 = K(3) \cdot \bar{\sigma}_a^5(0,0253) \cdot g_a = 0,8419 \cdot 680,9 \cdot 0,9526 = 546,08 \text{ барн};$$

$$\bar{\sigma}_f^5 = K(3) \cdot \bar{\sigma}_f^5(0,0253) \cdot g_f = 0,8419 \cdot 583,5 \cdot 0,9512 = 467,28 \text{ барн}.$$

Макроскопическое сечение поглощения гомогенной среды, усредненное по спектру Максвелла, рассчитаем по ниже приведенной формуле, результаты расчета занесем в таблицу 12.

$$\Sigma_a(E_{zp}, E_m) = \frac{V_{TOP}^{TBC} \cdot (N_5 \cdot \bar{\sigma}_a^5 + N_8 \cdot \bar{\sigma}_a^8 + N_O \cdot \bar{\sigma}_a^O + N_{Al_{гор}} \cdot \bar{\sigma}_a^{Al_{гор}}) + V_{H_2O}^{TBC} \cdot N_{H_2O} \cdot \bar{\sigma}_a^{H_2O} + V_{KM}^{TBC} N_{Al} \cdot \bar{\sigma}_a^{Al}}{V_{TBC}};$$

$$\Sigma_a(E_{zp}, E_m) = 0,125 \text{ см}^{-1}.$$

Таблица 12 - Исходные данные к расчету энергии сшивки

| x  |                   | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 8        | 10       |
|--|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| F(x)   |                   | 1,11026  | 1,05182  | 1,02263  | 1,00808  | 1,00188  | 1,00092  | 1,00343  |
| $\bar{\sigma}_a^i$ , барн  | $U^5$             | 546,08   | 517,34   | 502,98   | 495,82   | 492,77   | 492,30   | 493,54   |
|  | $U^8$             | 2,282    | 2,161    | 2,101    | 2,072    | 2,059    | 2,057    | 2,062    |
|  | Al <sub>гор</sub> | 0,1936   | 0,1834   | 0,1784   | 0,1758   | 0,1747   | 0,1746   | 0,1750   |
|  | O                 | 0,000227 | 0,000215 | 0,000209 | 0,000206 | 0,000205 | 0,000205 | 0,000205 |
|  | Al                | 0,1936   | 0,1834   | 0,1784   | 0,1758   | 0,1747   | 0,1746   | 0,1750   |
|  | H <sub>2</sub> O  | 0,5557   | 0,5264   | 0,5118   | 0,5045   | 0,5014   | 0,5009   | 0,5022   |
| $\bar{\sigma}_f^i$ , барн  | $U^5$             | 467,28   | 442,68   | 430,40   | 424,27   | 421,66   | 421,26   | 422,32   |
| $\Sigma_a(E_{zp}, E_m)$ , см <sup>-1</sup>                           |                   | 0,125    | 0,119    | 0,116    | 0,114    | 0,113    | 0,113    | 0,113    |
| $\frac{\Sigma_a(E_{zp}, E_m)}{\zeta \Sigma_s(1)}$ , см <sup>-1</sup> |                   | 0,167    | 0,159    | 0,154    | 0,152    | 0,151    | 0,151    | 0,151    |
| f  |                   | 0,5595   | 0,3226   | 0,1755   | 0,0908   | 0,045    | 0,0215   | 0,01     |

По данным таблицы 12 строим график, из которого определяем относительную граничную энергию  $x_{гр}$ .

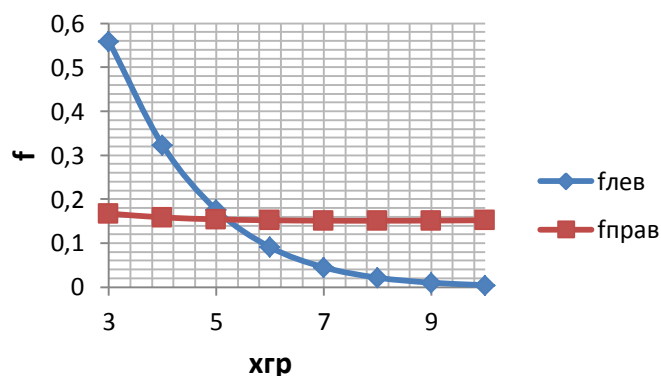


Рисунок 8 - К определению относительной граничной энергии

Из рис.8. видно, что  $x_{гр} = 5,2$ . Считаем граничную энергию:

$$E_{гр} = x_{гр} \cdot E_m = x_{гр} \cdot k(x_{гр}) \cdot T_{нз} = 5,2 \cdot 0,773 \cdot 10^{-4} \cdot 400 = 0,161 \text{ эВ};$$

$$E_m = 2 \cdot k \cdot T_{нз} = 0,0618 \text{ эВ}.$$

$E_{гр} \geq E_m$  – граничная энергия превышает среднюю энергию спектра Максвелла, следовательно, условие формирования спектра Максвелла выполнено.

#### 6.4. Вычисление микроскопических сечений реакций, приведенных к температуре нейтронного газа

При  $x_{гр}$  определяем  $\bar{\sigma}_a^i$  для каждого элемента:

$$F(5,2) = 0,8779 \cdot 5,2^{-1} + 0,01471 \cdot 5,2 + 0,7735 = 1,0188;$$

$$K(5,2) = \sqrt{\frac{293}{400}} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot 1,0155 = 0,773;$$

$$\bar{\sigma}_a^i(E) = \sigma_{a0}^i \cdot K(5,2);$$

$$\bar{\sigma}_{a,f}^5 = K(5,2) \cdot \bar{\sigma}_{a,f}^5(0,0253) \cdot g_{a,f};$$

Транспортное сечение для всех элементов, кроме воды  $\bar{\sigma}_{tr}$  будем считать по следующим выражениям:  $\bar{\sigma}_{tr} = \bar{\sigma}_{aj} + \bar{\sigma}_{sj} \cdot (1 - \bar{\mu}_j)$ ,

где  $\bar{\mu}_j = 2/(3 \cdot A_j)$  – средний косинус угла рассеяния.

Транспортное микроскопическое сечение воды равно:  $\bar{\sigma}_{tr}^{H2O} \approx 69 \cdot \left(\frac{293}{T_{нз}}\right)^{0,5}$ .

Таблица 13 - Усредненные сечения тепловой группы

| Элемент | $\bar{\sigma}_{aj}$ , барн | $\bar{\sigma}_f$ , барн | $\bar{\sigma}_{tr(1)}$ , барн |
|---------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| $U^5$   | 501,11                     | 428,794                 | 511,08                        |
| $U^8$   | 2,094                      |                         | 10,969                        |

Продолжение табл. 13

|            |         |  |       |
|------------|---------|--|-------|
| $Al_{гор}$ | 0,178   |  | 1,543 |
| $O_{гор}$  | 0,00021 |  | 3,604 |
| $Al$       | 0,178   |  | 1,543 |
| $H_2O$     | 0,510   |  | 59,05 |

Макроскопические сечения поглощения.

По гомогенизированной элементарной ячейке:  $\Sigma_a^{яч} = \frac{1}{V_{TBC}} \cdot \sum_i (VN \overline{\sigma_a}) = 0,115 \text{ см}^{-1};$

по блоку:  $\Sigma_a^{БЛ} = \frac{1}{V_{БЛ}} \cdot \sum_i (VN \overline{\sigma_a}) = 1,10 \text{ см}^{-1};$

по замедлителю:  $\Sigma_a^{ЗМ} = \frac{1}{V_{ЗМ}} \cdot \sum_i (VN \overline{\sigma_a}) = 0,014 \text{ см}^{-1};$

Находим замедляющие способности сред  $\xi \Sigma_s$ :

по гомогенизированной элементарной ячейке:

$$\xi \Sigma_s^{яч} = \frac{1}{V_{TBC}} \cdot \sum_{i=1} (VN \xi \overline{\sigma_s}) = 0,749, \text{ см}^{-1};$$

по зонам эквивалентного блока:

$$\xi \Sigma_s^{БЛ} = \frac{1}{V_{БЛ}} \cdot \sum_{i=1} (VN \xi \overline{\sigma_s}) = 0,0024, \text{ см}^{-1};$$

по замедлителю:

$$\xi \Sigma_s^{ЗМ} = \frac{1}{V_{ЗМ}} \cdot \sum_{i=1} (VN \xi \overline{\sigma_s}) = 0,825, \text{ см}^{-1}.$$

Находим макроскопические транспортные сечения  $\Sigma_{tr}$ :

по гомогенизированной элементарной ячейке:

$$\Sigma_{tr}^{яч} = \frac{1}{V_{TBC}} \cdot \sum_{i=1} (VN \overline{\sigma_{tr}}) = 1,215, \text{ см}^{-1};$$

по зонам эквивалентного блока:

$$\Sigma_{tr}^{БЛ} = \frac{1}{V_{БЛ}} \cdot \sum_{i=1} (VN \overline{\sigma_{tr}}) = 1,228, \text{ см}^{-1};$$

по замедлителю:

$$\Sigma_{tr}^{ЗМ} = \frac{1}{V_{ЗМ}} \cdot \sum_{i=1} (VN \overline{\sigma_{tr}}) = 1,214, \text{ см}^{-1}.$$

Находим макроскопические сечения деления  $\Sigma_f$ :

по гомогенизированной элементарной ячейке:

$$\Sigma_f^{яч} = \frac{1}{V_{TBC}} \cdot \sum_{i=1} (VN \overline{\sigma_f}) = 0,086, \text{ см}^{-1};$$

по зонам эквивалентного блока:

$$\Sigma_f^{БЛ} = \frac{1}{V_{БЛ}} \cdot \sum_{i=1} (VN \overline{\sigma_f}) = 0,935, \text{ см}^{-1};$$

## 6.5. Расчет коэффициента размножения активной зоны

Расчет производится по формуле четырех сомножителей [15]:

$$K_{\infty} = \nu \cdot \mu \cdot \phi \cdot \Theta,$$

где  $\nu$  – среднее число вторичных быстрых нейтронов, рождающихся в результате захвата теплового нейтрона в  $U^5$ ;  $\mu$  – коэффициент, учитывающий увеличение числа замедлившихся нейтронов за счёт размножения на быстрых в результате деления ядер  $U^8$ ;  $\phi$  – вероятность избежать резонансного захвата при замедлении в тепловую группу;  $\Theta$  – коэффициент использования тепловых нейтронов.

Определяем число вторичных нейтронов:  $\nu = \nu_f^5 \cdot \frac{\bar{\sigma}_f^5}{\bar{\sigma}_a^5} = 2,416 \cdot \frac{428,8}{501,11} = 2,067$  ,

где  $\nu_f^5 = 2,416$ - среднее число вторичных быстрых нейтронов, рождающихся при делении одного ядра;

$\bar{\sigma}_f^5 = 428,8$  *барн* – микроскопическое сечение деления урана-235,

усредненное по спектру Максвелла;

$\bar{\sigma}_a^5 = 501,11$  *барн* – микроскопическое сечение поглощения урана-235,

усредненное по спектру Максвелла.

Вычисляем коэффициент размножения на быстрых нейтронах для

тесных решеток:  $\mu = 1 + 0,19 \cdot \frac{V_U^0}{V_U^0 + V_{H_2O}^0}$  ,

где  $V_U^0 = V_U \cdot \frac{\gamma_z}{\gamma_{Me}} = V_U \cdot \frac{N_{хол}^8}{N^8}$  – объем урана, приведенный к нормальной

плотности;

$V_{H_2O}^0 = V_{H_2O} \cdot \frac{\gamma_{H_2O}(\bar{T}_{ми})}{\gamma_{H_2O}(20^\circ C)}$  – объем воды, приведенной к нормальной плотности.

Концентрация урана с 90% обогащением:

$$N_{UO_2} = 2,423 \cdot 10^{21} \text{ моль / см}^{-3};$$

$$N_{хол}^5 = 2,181 \cdot 10^{21} \text{ моль / см}^{-3};$$

$$N_{хол}^8 = 2,423 \cdot 10^{20} \text{ моль / см}^{-3};$$

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 45   |

$$N^8 = \frac{N_A \cdot \gamma_U}{238} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 18,7}{238} = 4,732 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3};$$

$$V_U^0 = 4,72 \cdot \frac{2,423 \cdot 10^{20}}{4,732 \cdot 10^{22}} = 0,024 \text{ см}^2;$$

$$V_{H_2O}^0 = 27,98 \cdot \frac{0,988}{0,9982} = 27,69 \text{ см}^2;$$

$$\mu_{U+H_2O} = 1 + 0,19 \cdot \frac{0,024}{0,024 + 27,69} = 1,0 \phi$$

Вероятность избежать резонансного захвата по формуле Егiazарова [18]:

$$-\ln(\varphi) = \frac{\sqrt{k_\varepsilon} \cdot k_T \cdot R_U^{3/2} + 0,73 \cdot R_U^2 \cdot k_\varepsilon}{(\xi \Sigma_s)_{3M} \cdot V_{3M}},$$

где  $k_T = 0,755 \cdot (1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{T_{эфф}})$  – коэффициент, который учитывает температуру горючего;

$$k_\varepsilon = \frac{N_{хол}^8}{N^8} = \frac{2,243 \cdot 10^{20}}{4,732 \cdot 10^{22}} = 0,005121 \text{ – коэффициент, учитывающий пористость}$$

горючего;

$$R_U = \sqrt{\frac{V_U}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,024}{3,14}} = 0,088 \text{ см – половина размера блока};$$

$$k_T = 0,755 \cdot (1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{20 + 273}) = 0,981;$$

$$-\ln \varphi = \frac{\sqrt{0,00461} \cdot 0,981 \cdot (0,088)^{3/2} + 0,73 \cdot (0,088)^2 \cdot 0,005121}{0,825 \cdot 46,4} = 4,60 \cdot 10^{-5};$$

$$\varphi = 1.$$

$$\text{Коэффициент использования тепловых нейтронов: } \frac{1}{\theta_{зем}} = 1 + f \cdot \frac{\Sigma_a^{3M}}{\Sigma_a^5} + E - 1,$$

где  $f$  – коэффициент проигрыша;

$E - 1$  – поправка на внешний блок-эффект.

Коэффициент проигрыша без учета внешнего блок-эффекта:

$$f = 1 + \frac{(\alpha' \cdot R_{\delta l})^2}{8} + \frac{(\alpha' \cdot R_{\delta l})^4}{192},$$

$$\text{где } \alpha' = \sqrt{\frac{\Sigma_a^{\delta l}}{D}} = \sqrt{3 \cdot \Sigma_a^{\delta l} \cdot \Sigma_{tr}^{\delta l}} \text{ – по блоку.}$$

$$\alpha' = \sqrt{3 \cdot 1,10 \cdot 1,228} = 2,013 \text{ см}^{-1};$$

$$f = 1 + \frac{(2,013 \cdot \frac{2,452}{2})^2}{8} + \frac{\left(2,013 \cdot \frac{2,452}{2}\right)^4}{192} = 1,955.$$

Поправка на внешний блок-эффект:

$$E - 1 = \left( \frac{\alpha'' \cdot R_{эя}}{2} \right) \cdot \left( \ln \left( \frac{R_{эя}}{R_{бл}} \right) - 0,75 \right),$$

где  $\alpha'' = \sqrt{\frac{\Sigma_a^{3M}}{D}} = \sqrt{3 \cdot \Sigma_a^{3M} \cdot \Sigma_{tr}^{3M}}$  – по замедлителю;

$$\alpha'' = \sqrt{3 \cdot 0,014 \cdot 1,214} = 0,226 \text{ см}^{-1};$$

$$E - 1 = \frac{\left(0,226 \cdot \frac{8,07}{2}\right)^2}{2} \cdot \left( \ln \left( \frac{8,07}{1,226} \right) - 0,75 \right) = 0,183.$$

Макроскопическое сечение поглощения урана-235:

$$\Sigma_a^5 = N_{хол}^5 \cdot \bar{\sigma}_a^5 = 2,181 \cdot 10^{21} \cdot 501,11 \cdot 10^{-24} = 1,093 \text{ см}^{-1}.$$

Тогда коэффициент использования тепловых нейтронов:

$$\theta = \left( 1 + 1,955 \cdot \frac{0,014}{1,093} + 0,183 \right)^{-1} = 0,823.$$

Квадрат длины диффузии в решетке определяется согласно:

$$L_{реш}^2 = L_{3M}^2 \cdot (1 - \theta_{сет}) + L_{бл}^2 \cdot \theta_{сет},$$

где  $L_{3M}^2 = \frac{1}{3 \cdot \Sigma_a^{3M} \cdot \Sigma_{tr}^{3M}}$  – квадрат длины диффузии в замедлителе;

$L_{бл}^2 = \frac{1}{3 \cdot \Sigma_a^{бл} \cdot \Sigma_{tr}^{бл}}$  – квадрат длины диффузии в блоке.

$$L_{3M}^2 = \frac{1}{3 \cdot 0,014 \cdot 1,214} = 19,612 \text{ см}^2;$$

$$L_{бл}^2 = \frac{1}{3 \cdot 1,1 \cdot 1,228} = 0,247 \text{ см}^2;$$

$$L_{реш}^2 = 19,612 \cdot (1 - 0,823) + 0,247 \cdot 0,823 = 3,682 \text{ см}^2.$$

Квадрат длины диффузии бериллиевого отражателя:  $L_{omp}^2 = \frac{1}{3 \cdot \Sigma_{tr}^{Be} \cdot \Sigma_a^{Be}} \cdot$

Транспортное макроскопическое сечение в отражателе:  $\Sigma_{tr}^{Be} = N_{хол}^{Be} \cdot \bar{\sigma}_{tr}^{Be};$

$$N_{Be} = \frac{N_A \cdot \gamma_{Be}}{A_{Be}} = \frac{0,6022 \cdot 10^{23} \cdot 1,85}{9} = 1,238 \cdot 10^{23} \text{ моль/см}^{-3}.$$

Вычисление микроскопического сечения поглощения Be, усредненного по спектру Максвелла и приведенного к температуре нейтронного газа:

$$\sigma_a^{Be} = 0,0092 \text{ барн};$$

$$\overline{\sigma_a^{Be}}(E) = \sigma_a^{Be} \cdot K(5,2) = 0,0092 \cdot 0,7824 = 0,007198.$$

Транспортное сечение Be:  $\bar{\sigma}_{tr} = \bar{\sigma}_a + \bar{\sigma}_s \cdot (1 - \bar{\mu}) = 0,007198 + 6 \cdot 0,926 = 5,563$ ,

где  $1 - \bar{\mu}_j = 1 - 2 / (3 \cdot A_j) = 1 - 2 / (3 \cdot 9) = 0,926$ ,

$\bar{\sigma}_s = 6$  - микроскопическое сечения рассеивания Be.

$$\Sigma_{tr}^{Be} = N_{хол}^{Be} \cdot \overline{\sigma}_{tr}^{Be} = 1,238 \cdot 10^{23} \cdot 5,563 \cdot 10^{-24} = 0,689 \text{ см}^{-1}.$$

Макроскопическое сечение поглощения в отражателе:

$$\Sigma_a^{Be} = 0,1238 \cdot 10^{24} \cdot 0,007198 \cdot 10^{-24} = 0,000891 \text{ см}^{-1},$$

Тогда, квадрат длины диффузии в отражателе:

$$L_{отр}^2 = \frac{1}{3 \cdot 0,689 \cdot 0,000891} = 543,3 \text{ см}^2.$$

Коэффициенты диффузии нейтронов:

$$D_{аз} = \frac{1}{3 \Sigma_{tr}^{аз}} = \frac{1}{3 \Sigma_{tr}^{яч}} = \frac{1}{3 \cdot 1,215} = 0,274 \text{ см},$$

$$D_{отр} = \frac{1}{3 \Sigma_{tr}^{отр}} = \frac{1}{3 \cdot 0,689} = 0,484 \text{ см},$$

Эффективная добавка слева и сзади аз:

$$\delta_{эф} = \frac{D_{аз}}{D_{отр}} \cdot L_{отр} \cdot th \frac{T}{L_{отр}} = \frac{0,274}{0,484} \cdot 23,31 \cdot th \frac{30 + 6,94}{23,31} = 12,1 \text{ см},$$

$$L_{отр} = 23,31 \text{ см},$$

$T = 30 + 6,94 \text{ см}$  – толщина отражателя в направлении исследуемого канала.

Эффективная добавка справа от аз:

$$\delta_{эф} = \frac{D_{аз}}{D_{отр}} \cdot L_{отр} \cdot th \frac{T}{L_{отр}} = \frac{0,274}{0,484} \cdot 23,31 \cdot th \frac{3 \cdot 6,94 + 30}{23,31} = 12,9 \text{ см},$$

$$L_{отр} = 23,31 \text{ см}, \quad T = 3 \cdot 6,94 + 30 \text{ см} \text{ – толщина отражателя}$$

Квадрат длины диффузии отражателя, который представлен бериллиевыми блоками, омываемыми водой, и свинцовым щитом:

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 48   |



$$L_{omp.2}^2 = \frac{1}{3 \cdot \Sigma_{tr}^{omp.2} \cdot \Sigma_a^{omp.2}}.$$

Транспортное макроскопическое сечение в отражателе:

$$\Sigma_{tr}^{omp.2} = \Sigma_{tr}^{omp.1} + \Sigma_{tr}^{Pb};$$

$$\Sigma_{tr}^{Pb} = N_{хол}^{Pb} \cdot \overline{\sigma}_{tr}^{Pb};$$

$$N_{Pb} = \frac{N_A \cdot \gamma_{Pb}}{A_{Pb}} = \frac{0,6022 \cdot 10^{24} \cdot 11,3}{207} = 3,287 \cdot 10^{22} \text{ моль/см}^{-3}.$$

Вычисление микроскопического сечения поглощения Pb, усредненного по спектру Максвелла и приведенного к температуре нейтронного газа:

$$\sigma_a^{Pb} = 0,17 \text{ барн};$$

$$\overline{\sigma}_a^{Pb}(E) = \sigma_a^{Pb} \cdot K(5,2) = 0,17 \cdot 0,7824 = 0,133.$$

Транспортное сечение Pb:

$$\overline{\sigma}_{tr} = \overline{\sigma}_a + \overline{\sigma}_s \cdot (1 - \overline{\mu}) = 0,133 + 11 \cdot 0,992 = 11,045$$

где  $1 - \overline{\mu}_j = 1 - 2 / (3 \cdot A_j) = 1 - 2 / (3 \cdot 82) = 0,992$ ,

$\overline{\sigma}_s = 11$  - микроскопическое сечения рассеивания Pb.

$$\Sigma_{tr}^{Pb} = N_{хол}^{Pb} \cdot \overline{\sigma}_{tr}^{Pb} = 3,287 \cdot 10^{22} \cdot 11,045 \cdot 10^{-24} = 0,363 \text{ см}^{-1}.$$

Транспортное макроскопическое сечение в отражателе:

$$\Sigma_{tr}^{omp.2} = \Sigma_{tr}^{omp.1} + \Sigma_{tr}^{Pb} = 0,689 + 0,363 = 1,052 \text{ см}^{-1}.$$

Макроскопическое сечение поглощения в отражателе:

$$\Sigma_a^{omp.2} = \Sigma_a^{Pb} + \Sigma_a^{omp.1} = 0,000887 + 0,00472 = 0,005607 \text{ см}^{-1},$$

$$\Sigma_a^{Pb} = 3,287 \cdot 10^{22} \cdot 0,133 \cdot 10^{-24} = 0,00436 \text{ см}^{-1},$$

Тогда, квадрат длины диффузии в отражателе:

$$L_{omp2}^2 = \frac{1}{3 \cdot 1,052 \cdot 0,005607} = 60,2 \text{ см}^2.$$

Коэффициенты диффузии нейтронов:

$$D_{аз} = 0,274 \text{ см},$$

$$D_{omp2} = \frac{1}{3 \Sigma_{tr}^{omp2}} = \frac{1}{3 \cdot 1,052} = 0,317 \text{ см},$$

Эффективная добавка спереди аз:

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 49   |

$$\delta_{эф2} = \frac{D_{a3}}{D_{omp2}} \cdot L_{omp} \cdot th \frac{T}{L_{omp2}} = \frac{0,274}{0,317} \cdot 7,8 \cdot th \frac{2 \cdot 6,94 + 30}{7,76} = 6,7 \text{ см},$$

$L_{omp2} = 7,76 \text{ см}, \quad T = 2 \cdot 6,94 + 30 \text{ см}$  – толщина отражателя в направлении щита.

Возраст нейтронов в решетке [18]:

$$\tau_p = \frac{\tau_{H_2O} \cdot \left(1 + \frac{V_{UO_2}}{V_{H_2O}} + \frac{V_{Al}}{V_{H_2O}}\right)^2}{\left(\gamma_{H_2O} + 0,82 \cdot \frac{V_{UO_2}}{V_{H_2O}} + 0,4 \cdot \frac{V_{Al}}{V_{H_2O}}\right)^2} = \frac{27,3 \cdot \left(1 + \frac{4,72}{27,98} + \frac{18,42}{27,98}\right)^2}{\left(1 + 0,82 \cdot \frac{4,72}{27,98} + 0,4 \cdot \frac{18,42}{27,98}\right)^2} = 46,38 \text{ см}^2,$$

где  $\tau_{H_2O} = 27,3 \text{ см}^2$  – возраст в чистой воде при  $\gamma_{H_2O} = 1 \text{ г/см}^3$  [5];

Возраст нейтронов в отражателе находим для диапазона энергий: от средней энергии спектра нейтронов деления равного 2 МэВ до индиевого резонанса  $E=1,46 \text{ эВ}$ . Т.к на Ве не происходит неупругого рассеяния, то эффективное микроскопическое транспортное сечение [20]:

$$\sigma_{tr}(u) = \sigma_c(u) + \sigma_s(u) \cdot (1 - \mu(u))$$

Сечение увода нейтронов из группы за счет упругого рассеяния нейтрона с ядром Ве:  $\sigma_R^{(i)} = (\zeta \sigma_s)^{(i)} / \Delta u$

Групповые константы для Ве представлены в таблице Б.1.

Согласно теории метода групп [20] возраст нейтронов в  $i$ -ой группе определяется:

$$\tau_i = \frac{D^{(i)}}{N \cdot (\sigma_a^{(i)} + \sigma_R^{(i)})}, \text{ где } \sigma_a^{(i)} = \sigma_c^{(i)},$$

Коэффициент диффузии нейтронов в группе определяется выражением:

$$D^{(i)} = \frac{1}{3 \cdot \Sigma_{tr}^{(i)}} = \frac{1}{3 \cdot N \sigma_{tr}^{(i)}}.$$

Результаты расчета возраста в группах для Ве занесены в таблицу Б.2.

В интервале 2,0...1,4 МэВ, с учетом поправки, возраст будет иметь значение равное  $13,33 \text{ см}^2$ , а в последней 23 группе  $-1,43 \text{ см}^2$ .

После сложения всех составляющих в группах с учетом правки значение возраста в Ве:

$$\sum \tau_i^{2 \text{ МэВ} \dots 1,46 \text{ эВ}} = 71,43 \text{ см}^2.$$

Площадь миграции равна:

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 50   |

$$M^2 = L_{отр}^2 + \tau_{отр} = 543,3 + 71,43 = 614,7 \text{ см}^2.$$

По определению эффективный коэффициент размножения учитывает процессы размножения и поглощения, а также утечки быстрых и тепловых нейтронов в среде конечных размеров:

$$K_{эф} = K_{\infty} \cdot P_{зам} \cdot P_{диф},$$

где  $P_{зам}$ ,  $P_{диф}$  – вероятности того, что нейтрон избежит утечки из реактора в процессе замедления и диффузии. В возрастно-диффузионном приближении эти вероятности имеют вид:

$$P_{зам} = \exp(-B^2 \tau_p);$$

$$P_{диф} = (1 + B^2 L_{реш}^2)^{-1}.$$

Материальный параметр  $B^2$  определяется следующей формулой:

$$B^2 \approx \left( \frac{3,14}{H + 2 \cdot \delta_{эф}} \right)^2 + \left( \frac{3,14}{a_0 + \delta_{эф.лев} + \delta_{эф.прав}} \right)^2 + \left( \frac{3,14}{a_0 + \delta_{эф.пер} + \delta_{эф.зад}} \right)^2 =$$

$$= \left( \frac{3,14}{58 + 2 \cdot 12,1} \right)^2 + \left( \frac{3,14}{28,6 + 12,1 + 12,9} \right)^2 + \left( \frac{3,14}{28,6 + 6,7 + 12,1} \right)^2 = 0,00928 \text{ см}^{-2}.$$

Вероятность избежать утечки нейтронов:

$$P_{зам} = \exp(-0,00928 \cdot 46,38) = 0,65;$$

$$P_{диф} = (1 + 0,00928 \cdot 3,682)^{-1} = 0,967.$$

Коэффициент размножения нейтронов:

$$k_{\infty} = \nu \cdot \mu \cdot \varphi \cdot \theta = 2,067 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,823 = 1,701.$$

Тогда, эффективный коэффициент размножения нейтронов:

$$k_{эф}(t_{xp}) = k_{\infty} \cdot P_{зам} \cdot P_{диф} = 1,701 \cdot 0,65 \cdot 0,967 = 1,07.$$

По экспериментальным данным  $k_{эф} = 1,0034$  [3], наш расчет дает погрешность:

$$\Delta k_{эф} = \frac{k_{эф.расч} - k_{эф.изв}}{k_{эф.расч}} = \frac{1,07 - 1,0034}{1,07} \cdot 100\% = 6,2\%.$$

## 6.6. Подготовка двухгрупповых констант для расчета реактора

Сначала запишем систему четырехгрупповых уравнений, с учетом нормировки источников на единицу [17]:

$$\begin{cases} \left( D^{(1)} B^2 + \Sigma_a^{(1)} + \Sigma_d^{(1)} \right) \cdot \Phi^{(1)} = \frac{\chi^{(1)}}{k_{эф}}; \\ \left( D^{(2)} B^2 + \Sigma_a^{(2)} + \Sigma_d^{(2)} \right) \cdot \Phi^{(2)} = \frac{\chi^{(2)}}{k_{эф}} + \Sigma_d^{(1)} \cdot \Phi^{(1)}; \\ \left( D^{(3)} B^2 + \Sigma_a^{(3)} + \Sigma_d^{(3)} \right) \cdot \Phi^{(3)} = \Sigma_d^{(2)} \cdot \Phi^{(2)}; \\ \left( D^{(4)} B^2 + \Sigma_a^{(4)} \right) \cdot \Phi^{(4)} = \Sigma_d^{(3)} \cdot \Phi^{(3)}. \end{cases}$$

Выразим отсюда групповые потоки нейтронов по гомогенизированной зоне реактора:

$$\begin{aligned} \Phi^{(1)} &= \frac{\chi^{(1)}}{k_{эф} \cdot \left( D^{(1)} B^2 + \Sigma_a^{(1)} + \Sigma_d^{(1)} \right)}, \\ \Phi^{(2)} &= \frac{\chi^{(2)} / k_{эф} + \Sigma_d^{(1)} \cdot \Phi^{(1)}}{\left( D^{(2)} B^2 + \Sigma_a^{(2)} + \Sigma_d^{(2)} \right)}, \\ \Phi^{(3)} &= \frac{\Sigma_d^{(2)} \cdot \Phi^{(2)}}{\left( D^{(3)} B^2 + \Sigma_a^{(3)} + \Sigma_d^{(3)} \right)}, \\ \Phi^{(4)} &= \frac{\Sigma_d^{(3)} \cdot \Phi^{(3)}}{\left( D^{(4)} B^2 + \Sigma_a^{(4)} \right)}. \end{aligned}$$

где  $B^2 = 0,00928 \text{ см}^{-1}$  - геометрический параметр;  $\chi^{(k)}$  - доля нейтронов в спектре деления, попадающая в  $k$ -ю группу, рассчитывается, в табл. 14:

$$\chi^{(k)} = \frac{\nu_f^{(k)U^5} + \nu_f^{(k)U^8}}{\sum_1^4 \nu_f^{(k)U^5, U^8}},$$

Вычислим недостающие сечения для 3 группы.

Значение сечения поглощения для 3 группы для  $U^8$  получаем с помощью теоремы эквивалентности, [17]:

$$\sigma_{aU^8}^{(3)} = 0,1793 + 2,889 \cdot \sqrt{\frac{F}{M_8}} = 0,1793 + 2,889 \cdot \sqrt{\frac{1610}{26,22}} = 22,82 \text{ барн},$$

$F = 4 \cdot a_0 \cdot H_0 = 4 \cdot 6,94 \cdot 58 = 1610 \text{ см}^2$  площадь поверхности топливного блока,  
 $M_8 = V_{зоп} \cdot \gamma_{U^8} = 4,72 \cdot 58 \cdot 0,0958 = 26,22 \text{ г}$  - масса поглотителя в блоке.

Значение сечения поглощения и деления для 3 группы для  $U^5$  вычисляем через резонансный интеграл для гомогенной среды, [17]:

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 52   |

Эффективный резонансный интеграл для тесных решеток блока из  $UO_2$  :

$$I_{a\phi}^{som} = A'_1 + C'_1 \sqrt{\frac{\sigma_{замU5}^{(3)}}{\sigma_{замU5}^{(3)} + D'_1}}$$

$$\sigma_{замU5}^{(3)} = \frac{\sum_j \sigma_{pj}^{(3)} \cdot N_j}{N_{U5}} = \frac{8,7 \cdot 0,002181 + 8,7 \cdot 0,0002423 + 1,4 \cdot 0,0602 + 3,8 \cdot 0,004846}{0,002181} = 56,76 \text{ б, -}$$

сечение потенциального рассеяния смеси, отнесенное к одному атому поглотителя;

$$\sigma_{aU5}^{(3)} = A_1 + C_1 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{замU5}^{(3)}}{\sigma_{замU5}^{(3)} + D_1}} = 21,1 + 18,9 \cdot \sqrt{\frac{56,76}{56,76 + 1482}} = 24,73 \text{ б,}$$

$A_1 = 21,1$ ;  $C_1 = 18,9$ ;  $D_1 = 1482$  – экспериментальные коэффициенты [17].

Расчёт многогрупповых спектров нейтронов начинается с определения макроскопических сечений элементов во всех группах. По известным ядерным плотностям  $N_j$  элементов и четырехгрупповым микросечениям рассчитываем, в табл. Г.1:

$$\Sigma_{pj}^{(k)} = \sigma_{pj}^{(k)} \cdot N_j ;$$

Транспортное сечение воды в 3х быстрых группах находим:

$$\Sigma_{trH_2O}^{(k)} = \Sigma_{trH}^{(k)} + \Sigma_{trO}^{(k)} = \sigma_{trH}^{(k)} \cdot 2N_{H_2O} + \sigma_{trO}^{(k)} \cdot N_{H_2O},$$

Находим усредненные макросечения для каждой группы:

$$\Sigma_p = \frac{V_{ГОР} \cdot (\Sigma_p^5 + \Sigma_p^8 + \Sigma_p^0 + \Sigma_p^{Al}) + V_{H_2O} \cdot \Sigma_p^{H_2O} + V_{KM} \cdot \Sigma_p^{Al}}{V_{TBC}} ;$$

где  $p$  - индекс процесса;

$k$ - число энергетических групп.

Коэффициент диффузии:

$$D^{(k)} = \frac{1}{3 \cdot \Sigma_{tr}^{(k)}} ;$$

Рассчитываем реактор в двухгрупповом приближении - выделяем две области энергий: замедления  $(E_f \div E_{zp})$  и тепловых нейтронов  $(E \leq E_{zp})$ . Усредняем константы: первые три группы нейтронов объединяем в одну в соответствии с весами потоков быструю «Б», четвертая группа соответствуют тепловым нейтронам «Т», табл.15.

Для быстрой группы сечение поглощения, коэффициент диффузии, произведение  $\nu_f^B \cdot \Sigma_f^B$  определяется в соответствии с весами потоков:

$$D^B = \frac{\sum_{n=1}^3 D^{(n)} \cdot \Phi^{(n)}}{\sum_{n=1}^3 \Phi^{(n)}}, \quad \Sigma_a^B = \frac{\sum_{n=1}^3 \Sigma_a^{(n)} \cdot \Phi^{(n)}}{\sum_{n=1}^3 \Phi^{(n)}}, \quad \nu_f^B \cdot \Sigma_f^B = \frac{\sum_{n=1}^3 \nu_f^n \cdot \Sigma_f^n \cdot \Phi^{(n)}}{\sum_{n=1}^3 \Phi^{(n)}};$$

Сечение увода:

$$\Sigma_d^B = \frac{\Sigma_d^{(3)} \cdot \Phi^{(3)}}{\sum_{n=1}^3 \Phi^{(n)}},$$

Вероятность избежать резонансного поглощения:

$$\varphi = \frac{\Sigma_d^{(3)}}{\Sigma_a^{(3)} + \Sigma_d^{(3)}},$$

Возраст нейтронов:

$$\tau_p = \frac{D^\delta}{\Sigma_a^\delta + \Sigma_d^\delta},$$

Квадрат длины диффузии:

$$L_p^2 = \frac{D^{(4)}}{\Sigma_a^{(4)}},$$

Таблица 14 - Величины, полученные при расчете групповых потоков

| Группы | $\chi^{(k)}$ | $\Sigma_a^{(k)}$ | $\Sigma_d^{(k)}$ | $\Sigma_{tr}^{(k)}$ | $D$   | $\Phi$ |
|--------|--------------|------------------|------------------|---------------------|-------|--------|
| 1      | 0,528        | 0,0005           | 0,069            | 0,144               | 2,311 | 5,412  |
| 2      | 0,236        | 0,0005           | 0,082            | 0,277               | 1,201 | 6,358  |
| 3      | 0,236        | 0,0111           | 0,083            | 0,350               | 0,952 | 5,081  |
| 4      | 0,000        | 0,1150           | 0,000            | 1,215               | 0,274 | 3,576  |

Таблица 15 – Константы, усредненные при двухгрупповом приближении

| Группы | $\Sigma_a^{(k)}$ | $\Sigma_d^{(k)}$ | $D$   | $\nu_f \cdot \Sigma_f$ | $\varphi$ | $\tau_p$ | $L_p^2$ |
|--------|------------------|------------------|-------|------------------------|-----------|----------|---------|
| «Б»    | 0,003708         | 0,02495          | 1,299 | 0,003118               | 0,882     | 45,33    | 2,39    |
| «Т»    | 0,115            |                  | 0,274 | 0,2086                 |           |          |         |

## 6.7. Плотность потока быстрых и тепловых нейтронов

Будем предполагать, что поглощение всех быстрых нейтронов происходит на границе двух энергетических групп при  $E=E_{гр}$ , где поток нейтронов скачком уменьшается в  $\varphi$  раз.

Групповые уравнения для а.з., для потоков быстрых нейтронов и тепловой группы:

$$D_{\bar{o}1}\Delta\Phi_{\bar{o}1}-\Sigma_{R\bar{o}1}\Phi_{\bar{o}1}+\frac{k_{\infty}}{\varphi}\Sigma_{a\tau1}\Phi_{\tau1}=0, \quad (1)$$

$$D_{\tau1}\Delta\Phi_{\tau1}-\Sigma_{a\tau1}\Phi_{\tau1}+\varphi\Sigma_{R\bar{o}1}\Phi_{\bar{o}1}=0. \quad (2)$$

Где:  $\Sigma_{R\bar{o}1} = \frac{D_{\bar{o}1}}{\tau}$  - сечение увода,

$\frac{k_{\infty}}{\varphi}\Sigma_{a\tau1}\Phi_{\tau1} = I_{\bar{o}}$  интенсивность генерации быстрых нейтронов источником, для простоты обусловлена делением только в тепловой области энергий,

$\varphi\Sigma_{R\bar{o}1}\Phi_{\bar{o}1}$  интенсивность генерации тепловых нейтронов.

Запишем граничные условия, используя метод эффективных Г.У.:

$$1^{\circ} x=0, \Delta\Phi_{\bar{o}1}=\Delta\Phi_{\tau1}=0,$$

$$2^{\circ} x=R_{\varphi\phi}, \Phi_{\bar{o}1}=\Phi_{\tau1}=0.$$

Для решения уравнений (1), (2) заметим характерную особенность - уравнения симметричны относительно потоков. Поэтому потоки быстрых и тепловых нейтронов описываются волновым уравнением с собственным числом  $\alpha^2$ :

$$\Delta\Phi_{\bar{o}1}+\alpha^2\Phi_{\bar{o}1}=0, \quad (3)$$

$$\Delta\Phi_{\tau1}+\alpha^2\Phi_{\tau1}=0. \quad (4)$$

Подставляя из (3,4) значения  $\Delta\Phi_{\bar{o}1}, \Delta\Phi_{\tau1}$  в (1,2), имеем:

$$(D_{\bar{o}1}\alpha^2-\Sigma_{R\bar{o}1})\Phi_{\bar{o}1}=\frac{k_{\infty}}{\varphi}\Sigma_{a\tau1}\Phi_{\tau1}, \quad (5)$$

$$(D_{\tau1}\alpha^2-\Sigma_{a\tau1})\Phi_{\tau1}=\varphi\Sigma_{R\bar{o}1}\Phi_{\bar{o}1}. \quad (6)$$

Т.к.  $\alpha^2$  двухгрупповой аналог материального параметра равного геометрическому  $B^2$  и имеет два разных значения для потока быстрых и тепловых нейтронов:

$$\alpha_1^2 = B^2(1-\varepsilon+2\varepsilon^2),$$

$$\varepsilon = \frac{B^2}{1/L_1^2+1/\tau},$$

$$\alpha_2^2 = -(\alpha_1^2+1/L_1^2+1/\tau).$$

Тогда уравнения (5,6) будут выглядеть:

$$(D_{\bar{o}1}\alpha_1^2 - \Sigma_{R\bar{o}1})\Phi_{\bar{o}1} = \frac{k_{\infty}}{\varphi} \Sigma_{aT1} \Phi_{T1}, \quad (7)$$

$$(D_{T1}\alpha_2^2 - \Sigma_{aT1})\Phi_{T1} = \varphi \Sigma_{R\bar{o}1} \Phi_{\bar{o}1}. \quad (8)$$

Интенсивность генерации быстрых нейтронов  $I_{\bar{o}}$ :

$$I_{\bar{o}} = \frac{Q}{V} \cdot \frac{\nu}{Ef} = \frac{8 \cdot 10^6}{0,286^2 \cdot 0,58} \cdot \frac{2,067}{3,2 \cdot 10^{-11}} = 1,09 \cdot 10^{19} \text{ н / с},$$

$Ef = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Вм}$  – энергия одного деления

$\nu = 2,067$  – число вторичных нейтронов.

$$\frac{k_{\infty}}{\varphi} \Sigma_{aT1} \Phi_{T1} = I_{\bar{o}}, \text{ отсюда:}$$

$$\Phi_{T1} = \frac{I_{\bar{o}} \cdot \varphi}{k_{\infty} \Sigma_{aT1}}, \quad (9)$$

Подставим (9) в (8), выразим  $\varphi \Sigma_{R\bar{o}1} \Phi_{\bar{o}1}$ :

$$I_T = \varphi \Sigma_{R\bar{o}1} \Phi_{\bar{o}1} = (D_{T1}\alpha_2^2 - \Sigma_{aT1}) \cdot \frac{I_{\bar{o}} \cdot \varphi}{k_{\infty} \Sigma_{aT1}},$$

$$I_T = 2,88 \cdot 10^{18} \text{ н / с}.$$

Плотность потока тепловых нейтронов у поверхности образца при найденной интенсивности:

$$\Phi_T = \frac{I_T}{4\pi R_1^2} = \frac{2,88 \cdot 10^{18}}{4 \cdot 3,14 \cdot 100^2} = 2,29 \cdot 10^{13}, \text{ н / (см}^2\text{с)}$$

Плотность потока быстрых нейтронов у поверхности образца:

$$\Phi_{\bar{o}} = \frac{I_{\bar{o}}}{4\pi R_1^2} = \frac{1,09 \cdot 10^{19}}{4 \cdot 3,14 \cdot 100^2} = 8,67 \cdot 10^{13}, \text{ н / (см}^2\text{с)}.$$



## 7. РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ ПРОЕКТА

Разработка проекта источника нейтронов для проведения эксперимента по регистрации запаздывающих  $\gamma$ - квантов делилась на два больших этапа. Первый – выбор геометрии проведения опыта и параметров всех компонентов эксперимента, исходя из имеющейся базы и расчет на этих параметрах необходимой плотности потока быстрых и тепловых нейтронов. Далее вторым этапом был выбор и расчет соответствующего геометрическим и физическим параметрам источника нейтронов. По результатам которого, максимальная рассчитанная плотность потока источника реактора ИР-8 превышает необходимую на 4-5 порядков, табл.16. Это говорит о том, что эксперимент можно проводить, не ограничиваясь только выбранной геометрией, но и варьируя расстояние между компонентами и размеры образцов.

Таблица 16 – Плотности потоков нейтронов у поверхности образца

| $\Phi, \text{н}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$ | Тепловыми нейтронами | Быстрыми нейтронами  |
|---|----------------------|----------------------|
| Необходимая                                   | $1,1 \cdot 10^8$     | $5,2 \cdot 10^{10}$  |
| Проектируемая                                 | $2,29 \cdot 10^{13}$ | $8,67 \cdot 10^{13}$ |

### 7.1. Оценка возможностей применимости системы

Важно понимать, что в проведенной разработке использовались данные эффективности регистрации детектором пиков, являющиеся максимальными. Здесь не учитываются возможность ошибочной регистрации мгновенных  $\gamma$ -квантов, эффекты каскадного суммирования пиков, поглощение потока нейтронов материалами защиты, влияние фона и т.д. Поэтому, имея более высокую плотность потока нейтронов, можно скомпенсировать недостатки эффективности регистрации детектором запаздывающих  $\gamma$ -квантов.

В системе возможно определить наибольшие эффективности регистрации при проведении измерения с расположением детектора от образца ДМ на разных расстояниях, тем самым выбрав оптимальное – когда

регистрация мгновенных  $\gamma$ -квантов не будет происходить и запаздывающие  $\gamma$ -кванты не успевают потерять своей интенсивности.

Используя источник нейтронов реактор ИР-8 на максимальном уровне мощности, с высокообогащенной загрузкой мы получаем максимальные параметры регистрации. Для набора статистики, спектр должен показать 10 тыс. счетов, если учесть, что 1 счет – 1 зарегистрированный импульс в секунду, то реактор должен проработать на мощности 10 тыс. секунд – 3 часа.

Имея запас по интенсивности потока нейтронов, можно произвести конверсию ИР на низкообогащенное топливо с содержанием 19,75%  $U^{235}$ . Что снизит плотность потока тепловых нейтронов до 37 %, но при этом уменьшит затраты на использование топлива в 1,5 раз [23].

Вышеизложенное позволяет говорить о применимости источника нейтронов для системы регистрации запаздывающих  $\gamma$ -квантов  $U^{235}$  и  $Pu^{239}$ , а так же для других различных ядерно-физических исследований, где нужно иметь высокие плотности потоков нейтронов.

## 8. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА ИР-8

Система контроля мощности реактора обеспечивает измерение уровня мощности и скорости нарастания мощности (периода удвоения).

### 8.1. Канал автоматического регулирования

Система автоматического регулирования работает в двух режимах [21]:

- производит автопуск реактора (из подкритического состояния до значений  $10^{-4} N_{ном} - N_{ном}$ )
- автоматическое поддержание заданного уровня мощности в диапазоне  $10^{-4} N_{ном} - N_{ном}$ .

Возможен переход мощностей в диапазоне  $10^{-3} N_{ном} - N_{ном}$ . При этом период удвоения мощности  $T_{1/2} = 30$  с.

### 8.2. Описание принципиальной схемы контроля и автоматизации ИР-8

Канал автоматического регулирования состоит из, рисунок 9:

- ионизационной камеры ИК-АР,
- задатчика мощности ЗДМ-ИР-8,
- блока автоматического регулирования БАР,
- коммутатора управляющих сигналов,
- выходного усилителя УВАР-17,
- исполнительного механизма АР (двигатель МИ-12Ф, редуктор, барабан-трос),
- стержня АР,
- канала защиты по скорости разгона реактора с ионизационной камерой ИК-2С и усилителем сигнала 2УЗС [21].

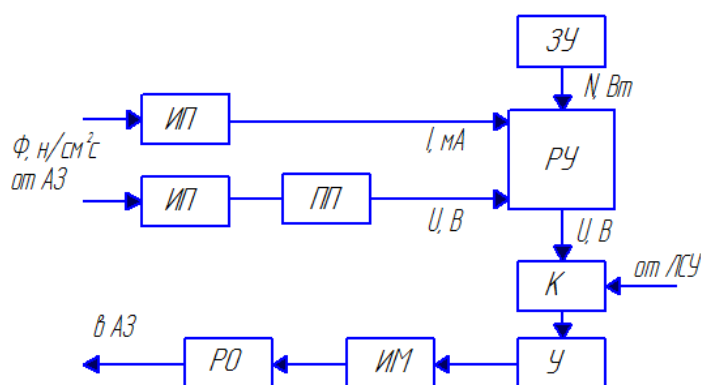


Рисунок 9 - Принципиальная схема канала автоматического регулирования

Таблица 17 – Условные обозначения рисунка 9

| Обозначение | Наименование                  | Количество |
|-------------|-------------------------------|------------|
| ИП          | Измерительный преобразователь | 2          |
| ПП          | Промежуточный преобразователь | 1          |
| ЗУ          | Задающее устройство           | 1          |
| РУ          | Регулирующее устройство       | 1          |
| К           | Коммутатор                    | 1          |
| У           | Усилитель                     | 1          |
| ИМ          | Исполнительный механизм       | 1          |
| РО          | Регулирующий орган            | 1          |
| ЛСУ         | Логические схемы управления   |            |
| АЗ          | Активная зона реактора ИР-8   |            |

### 8.3. Выбор технических средств для реализации систем контроля и автоматизации ИР-8.

Ионизационная камера (ИК) – детектор нейтронного потока, используется КНК-53М с компенсацией гамма фона и чувствительностью к тепловым нейтронам  $4 \cdot 10^{-14} \text{ А}/(\text{н} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1})$ . Регулируемое напряжение +500-500 В. Линейный диапазон работы камеры 0–15 мА. В электрической схеме используется разность сигналов от двух частей камеры: 1й – регистрирующей нейтроны и гамма-фон, 2й – только гамма-фон.

Блок автоматического регулирования (БАР) осуществляет автоматический вывод реактора на заданный уровень мощности с заданным периодом и поддерживает мощность в диапазоне  $0,2-110\% N_{\text{ном}}$ . Входные сигналы: ток ИК пропорциональный мощности реактора «I» и напряжение постоянного тока, обратно пропорциональное периоду разгона реактора «U».

$I_{\max} = 100 \text{ мкА}$ . Выходной сигнал – «U», пропорциональный отклонениям входных сигналов от заданных значений, при отклонении на  $\pm 10\% - \pm 10B$ .

Усилитель защиты по скорости 2УЗС – логарифмически преобразовывает период изменения тока ИК в напряжение постоянного тока, обратно пропорционально периоду изменения мощности реактора  $T_e$ . Диапазон преобразования входного тока ИК равен  $10^{-11} - 10^{-4} \text{ А}$ .

Коммутатор разрешает или запрещает прохождение сигнала рассогласования с БАР на вход УВАР в зависимости от управляющего сигнала логики.

Усилитель выходной автоматического регулирования (УВАР-17) – усиливает сигнал рассогласования и управляет приводом исполнительного механизма: двигателем постоянного тока МИ-12Ф. Входная величина УВАР по сигналу рассогласования -  $U_{\max} = 10B$ , по сигналу обратной связи по скорости вращения  $U_{\max} = 75B$ .

Стержень АР. Привод АР состоит из двигателя постоянного тока МИ-12Ф и редуктора, к нему подключены 8 промежуточных и конечных выключателей и датчик положения стержня. Возможно перемещение стержня в ручном режиме [21].

Все элементы показаны на функциональной схеме, разработанной согласно [24], [25].

При разработке функциональной схемы были решены следующие задачи:

- изучена технологическая схема автоматизируемого объекта;
- изучены предельные положения контролируемых органов регулирования параметров технологического процесса;
- определено местоположение точек отбора измерительной информации и точек воздействия на регулируемые параметры;
- выбрана структура измерительных каналов;

- выбраны методы и технические средства получения, преобразования, передачи и представления измерительной информации;
- решены вопросы размещения технических средств автоматизации.

На чертеже функциональной схемы системы автоматического контроля и сигнализации представлены:

- технологическая схема объекта автоматизации;
- первичные и функциональные преобразователи, измерительные приборы, устройства оперативного управления;
- щит, блок регулирования;
- линии связи между техническими средствами автоматизации.

Функциональная схема представлена на листе ФЮРА 421000.000.С01

#### **8.4. Работа системы автоматического регулирования**

После задания требуемого уровня мощности БАР формирует сигнал разбаланса  $\Delta N$ .

Режим автопуска: сигнал рассогласования сравнивается с сигналом усилителя 2УЗС пропорционального отклонению  $T_e$  от  $T_{1/2}$ . Максимальный разбаланс до 7В блокируется сигналом коммутатора. Пропускаются сигналы если подано «разрешение» на подъем или опускание.

Режим автоматического регулирования мощности:

Заданный уровень мощности запоминается в БАР, сигнал  $\Delta N_{\max}$  блокируется, чтобы не появился сигнал «отказ АР». Максимальный сигнал  $\Delta N$  входит в УВАР, системой логики формируется сигнал «разрешение на подъем или опускание». Сигнал усиливается и подается на сервопривод, стержень АР поднимается до концевого выключателя А-20%, сигнал с логики исчезает и  $\Delta N$  не проходит на УВАР, двигатель останавливается.

Логика формирует сигналы перевески, начинают извлекаться компенсирующие стержни КС. При уменьшении  $T_e \leq T_{1/2}$  полярность сигнала  $\Delta N$  меняется, АР- вниз, до концевого выключателя А-20%, далее «разрешение на подъем», А-60%, снимется сигнал «перевеска», подъем КС

прекращается, достижение АР выключателя А-80% - снимется сигнал разрешение опускания, стержень останавливается. Сигнал «перевеска», стержень КС – вниз, полярность  $\Delta N$  меняется, АР- вверх. Достигает А-40% , КС останавливается, выключатель А-80%. Теперь стержень перемещается от А-20% до А-80%.

Ручной режим работы: сигналы с пульта от ключа ручного управления КРУ-А подаются в систему логики, там формируются сигналы «вверх, вниз», усиливаются и подаются на УВАР и на ИМ.

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 63   |

## 9. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Исследовательский реактор рассматривается, как предприятие, продукцией которого являются нейтроны, поглощенные в экспериментальных устройствах, и характеризуются производительностью грамм нейтронов в год -  $I \frac{\text{г нейтр}}{\text{год}}$  и стоимостью  $C$  продукции [21].

Таблица 18 – Исходные данные для реактора ИР-8

| Мощность        | Поток нейтронов                                   | Площадь экспериментальных каналов | Время цикла     | Число циклов в год | Потребление $U^{235}$ в год | Производительность                                  |
|-----------------|---|-----------------------------------|-----------------|--------------------|-----------------------------|---|
| $N, \text{кВт}$ | $\Phi, \frac{\text{нейтр}}{\text{см}^2 \text{с}}$ | $S_{\Sigma}, \text{см}^2$         | $t, \text{сут}$ | $n$                | $M, \text{г}$               | $I, \frac{\text{г} \cdot \text{нейтр}}{\text{год}}$ |
| 8000            | $10^{15}$   | $1,66 \cdot 10^3$                 | 31,3            | 5,3                | 2816                        | 40  |

Предположим что в ИР:

- 1) объемные доли урана и стартового материала в активной зоне пренебрежимо малы по сравнению с объемными долями воды и конструкционного материала;
- 2) активная зона квазигомогенна- твэлы тонкие;
- 3) плотность воды постоянна в активной зоне (аз);
- 4) плотность потока нейтронов постоянна в аз;
- 5) режим перегрузки – квазинепрерывный, т.е. нет запаса реактивности на выгорание, есть только на стационарное отравление;
- 6) плотность энерговыделения пропорциональна объемной доли конструкционного материала в аз, т.е. твэлы заданных размеров;
- 7) в материалах аз поглощаются только тепловые нейтроны [21].

Для экономического расчета экспериментальных реакторов применим следующий подход [26]:

1. Проектируемая производительность реактора принимается за постоянную величину.
2. Устанавливается в первом приближении цена на продукцию.
3. Проводится оптимизация реактора по критерию максимума прибыли.



4. Если полученная производительность меньше заданной, увеличивают цену и, наоборот, до выполнения пункта 3.

### 9.1. Планирование капиталовложений

Удельные затраты, согласно [21] составляют:

$$З = 250 \text{ дол/ кВт.};$$

С учетом курса определим затраты в рублях:

$$З_{yd} = \frac{З}{N},$$

$$З = З_{yd} \cdot N = 250 \cdot 8000 \cdot 63,5 = 127 \text{ млн.руб.}$$

$$N = 8000 \text{ кВт};$$

Функция затрат при времени, отсчитываемом от момента пуска реактора:

$$З = K + \frac{I}{p},$$

Где:  $K$  – капитальные вложения,  $I$  – текущие расходы,

$p = 1/T_{ок}$  - норматив эффективности капиталовложений (дисконтирования)

$T_{ок}$  - срок окупаемости капиталовложений (примем в начальном приближении 6 лет).

### 9.2. Планирование годовых издержек производства

При планировании годовых издержек на производство продукции составляется смета со следующими основными экономическими элементами затрат:

1. топливо;
2. заработная плата со всеми начислениями;
3. амортизация;
4. прочие расходы.

### 9.3. Удельная стоимость ядерного топлива

За период кампании с однородной топливной загрузкой стоимость одного грамма  $U^{235}$  [21]:

$$Ц_T = 20 \frac{\text{дол}}{\text{г}} U^{235} = 1270 \frac{\text{руб}}{\text{г}} U^{235};$$

Большая доля стоимости топлива приходится на изготовление сложной структуры материала сердечника – микротвэлы, запрессованные в

прочную алюминиевую матрицу. Сложная и не одинаковая форма твэлов увеличивает их стоимость. Большую долю составляет стоимость покрытия оболочки – стоимость материала особо тонкостенных пластин и их обработки. Удорожает стоимость твэлов так же контроль точности и надежности производства твэлов.

Зная потребление свежего урана  $U^{235}$  в год:

$$\bar{I}_T = 1270 \cdot 2816 = 3,58 \text{ млн.руб};$$

#### 9.4. Расчет фонда зарплаты

Основной годовой фонд зарплаты производственного персонала определяется как [27]:

$$I_{\text{зн}}^{\text{осн}} = n_{\text{шт}} \cdot N_y \cdot \Phi_{\text{год}}^{\text{ср}} \cdot (1 + \alpha_{\text{пр}}) = 2 \cdot 8 \cdot 45 \cdot 6204 \cdot (1 + 0,3) = 5,8 \text{ млн.руб},$$

где  $n_{\text{шт}} = 2$  - штатный коэффициент, определен из [28];  $\Phi_{\text{год}}^{\text{ср}}$  - среднегодовой фонд зарплаты на одного человека; для ИР величина  $\Phi_{\text{год}}^{\text{ср}}$  составляет 30..40 МРОТ. На 1 января 2016 года МРОТ равен 6204 рублей.

$\alpha_{\text{пр}}$  - премиальный фонд (20...40%) от заработной платы.

Помимо фонда основной заработной платы ИР формирует фонд дополнительной заработной платы  $I_{\text{зн}}^{\text{доп}}$ .

Фонд дополнительной заработной платы определяется в процентах (8-10%) от фонда основной заработной платы:

$$I_{\text{зн}}^{\text{доп}} = (0,08...0,1) \cdot I_{\text{зн}}^{\text{осн}} = 0,09 \cdot 5,8 = 0,52 \text{ млн.руб}.$$

Отчисления во внебюджетные фонды:

$$ОВФ = 0,3 \cdot (I_{\text{зн}}^{\text{доп}} + I_{\text{зн}}^{\text{осн}}) = 0,3 \cdot (22,35 + 2) = 1,9 \text{ млн.руб},$$

Полные затраты на заработную плату производственного персонала составляют:

$$I_{\text{зн}} = I_{\text{зн}}^{\text{осн}} + I_{\text{зн}}^{\text{доп}} + ОВФ = 5,8 + 0,52 + 1,9 = 8,23 \text{ млн.руб}.$$

#### 9.5. Амортизационные отчисления

На ИР определяются на основе нормы амортизации  $H_{\text{ам}} = 3\%$  в год - малое значение, из-за малой мощности ИР [28]:  $I_{\text{ам}} = \frac{K \cdot H_{\text{ам}}}{100} = 0,03 \cdot K$ .

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 66   |

## 9.6. Планирование прочих расходов

На ИР доля прочих расходов  $I_{np}$ , куда входят вспомогательные материалы, покупная вода, издержки на ремонт оборудования, услуги сторонних организаций, услуги вспомогательных производств и прочее [28]:

$$I_{np} = 0,4 \cdot (I_{zn} + I_{am}) = 0,4 \cdot (8,23 + 0,03 \cdot K).$$

Решаем систему уравнений, из которой находим капиталовложения и годовые издержки:

$$\begin{cases} 3 = K + \frac{I}{p}, \\ \frac{1}{p} = 8, \\ 3 = 127 \text{ млн.руб}, \\ I = I_{Тэксн} + I_{zn} + I_{am} + I_{np} = 3,58 + 8,23 + 0,03 \cdot K + 0,4 \cdot (8,23 + 0,03 \cdot K). \end{cases}$$

$$K = 4,7 \text{ млн.руб};$$

$$I_{am} = 0,03 \cdot K = 0,141 \text{ млн.руб};$$

$$I_{np} = 0,4 \cdot (8,23 + 0,03 \cdot K) = 3,35 \text{ млн.руб};$$

$$I = 15,3 \text{ млн.руб}.$$

## 9.7. Себестоимость продукции реактора ИР

$$\text{Производительность } I = 40 \frac{\text{г} \cdot \text{нейтр}}{\text{год}}.$$

Составляющие себестоимости продукта:

$$S_I^T = \frac{I_T}{I} = \frac{3,58 \cdot 10^6}{40} = 89 \frac{\text{тыс.руб} \cdot \text{год}}{\text{г} \cdot \text{нейтр}};$$

$$S_I^{am} = \frac{I_{am}}{I} = \frac{0,141 \cdot 10^6}{40} = 3,5 \frac{\text{тыс.руб} \cdot \text{год}}{\text{г} \cdot \text{нейтр}};$$

$$S_I^{zn} = \frac{I_{zn}}{I} = \frac{8,23 \cdot 10^6}{40} = 206 \frac{\text{тыс.руб} \cdot \text{год}}{\text{г} \cdot \text{нейтр}};$$

$$S_I^{np} = \frac{I_{np}}{I} = \frac{3,35 \cdot 10^6}{40} = 84 \frac{\text{тыс.руб} \cdot \text{год}}{\text{г} \cdot \text{нейтр}};$$

Полная себестоимость вырабатываемого продукта:

$$S_I = S_I^T + S_I^{am} + S_I^{zn} + S_I^{np} = 0,09 + 0,00094 + 0,21 + 0,083 = 0,38 \frac{\text{млн.руб} \cdot \text{год}}{\text{г} \cdot \text{нейтр}}.$$

## 9.8. Оценка прибыли и рентабельности ИР

Согласно принятому подходу принимаем цену на 1 г нейтронов в высокопоточном реакторе  $C_{нотр} = 0,4 \frac{\text{млн.руб}}{\text{г} \cdot \text{нейтр}}$ .

Выручка:

$$BV = Pr + I = I \cdot C_{нотр} = 40 \cdot 0,4 = 16 \frac{\text{млн.руб}}{\text{год}}.$$

Экономически обоснованная прибыль:

$$Pr = BV - I = 16 - 15,3 = 0,7 \frac{\text{млн.руб}}{\text{год}}.$$

Чистая прибыль с учетом налога,уплачиваемого на прибыль:

$$Pr_{\text{ч}} = 0,8 \cdot Pr = 0,7 \cdot 0,9 = 0,57 \text{ млн.руб.}$$

Оценка экономической эффективности инвестиций:

Чистый приведенный доход [28]:

$$\text{ЧПД} = \sum_{t=1}^T \frac{D_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=1}^5 \frac{-0,23}{(1+0,12)^t} + \sum_{t=6}^{30} \frac{0,71}{(1+0,12)^t} = 33,2 \text{ млн.руб}$$

где первое слагаемое учитывает затраты на первоначальную загрузку АТЭЦ;

$D_t = Pr_t + A_t - K_t$  – чистый доход в t-ом году, существования проекта;

$Pr_t$ ,  $A_t$ ,  $K_t$  – соответственно чистая прибыль, амортизация и инвестиции в t-ом году;

$T = T_{\text{стр}} + T_{\text{эсп}}$  – время строительства и эксплуатации проектируемого объекта.

$r = 0,12$  - ВНД- внутренняя норма доходности, отражает полную доходность проекта (ставка дискантирования).

$r = r_{\text{б}} + r_{\text{риск}} = 6 + 6 = 12\%$ , где  $r_{\text{б}}$  – доходность государственных долговых обязательств РФ;

$r_{\text{риск}}$  – премия за риск.

Чистый доход в первые 5 лет строительства ИР считается следующим образом:

$$K_t = \frac{K}{5} = \frac{4,7}{5} = 0,94 \text{ млн.руб.};$$

$$D_t = Pr_t + A_t - K_t = 0,57 + 0,141 - 0,94 = -0,23 \text{ млн.руб.}$$

В последующие годы чистый доход определяется как:

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 68   |

$$D_t = Pr_t + A_t = 0,57 + 0,141 = 0,71 \text{ млн.руб.}$$

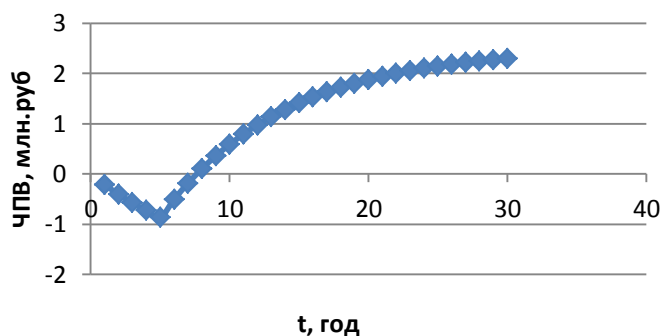


Рисунок 10 - Зависимость чистого приведенного дохода от времени строительства и эксплуатации проектируемого объекта

Исходя из графика находим срок окупаемости проекта:  $T_{ок} = 8 \text{ лет}$ .

Срок окупаемости инвестиций можно найти:

$$\sum_{t=1}^{t_{смп}} \frac{K_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=1}^{t_{ок}} \frac{Pr_t + A_t}{(1+r)^t}, \quad \sum_{t=1}^5 \frac{0,94}{(1+0,12)^t} = \sum_{t=6}^{t_{ок}} \frac{0,71}{(1+0,12)^t}.$$

$T_{ок} = 8 \text{ лет}$ .

РП – рентабельность проекта можно оценить найдя индекс рентабельности.

Индекс рентабельности инвестиционного привлекательного проекта должен быть больше единицы:

$$R = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{D_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{T_{смп}} \frac{K_t}{(1+r)^t}} = \frac{\sum_{t=1}^{30} \frac{0,71}{(1+0,12)^t}}{\sum_{t=1}^5 \frac{0,94}{(1+0,12)^t}} = 1,68,$$

Инвесторы могут принять положительное окончательное решение о целесообразности инвестирования средств в проект реактора ИР-8.

Таблица 19 — Техничко-экономические показатели ИР

| № | Наименование показателей                    | Размерность  | Величина |
|---|---|--|----------|
| 1 | Производительность продукта                 | $I \frac{\text{г нейтр}}{\text{год}}$                                  | 40       |
| 2 | Стоимость основных фондов                   | млн. руб.  | 4,7      |
| 4 | Средний процент амортизации основных фондов | %  | 3        |
| 5 | Сумма издержек производства за год          | млн. руб.  | 15,3     |
| 6 | Себестоимость производимой продукции        | $\frac{\text{млн.руб.} \cdot \text{год}}{\text{г} \cdot \text{нейтр}}$ | 0,38     |

Продолжение табл. 19

|                               |   |      |
|-------------------------------|---|------|
| Стоимость продукции           | $\frac{\text{млн.руб. год}}{\text{г} \cdot \text{нейтр}}$ | 0,4  |
| Срок окупаемости проекта      | год   | 8    |
| Индекс рентабельности проекта |   | 1,68 |

Вывод: проект реактора ИР-8 для экспериментальных целей окупает себя за 8 лет. Такое значение было получено методом удовлетворения условию наибольшей выгоды. Для данного исследовательского реакторов, генерирующего один из высоких потоков в мире такая цена приемлема. Отсутствие конкуренции. У проектируемого реактора лучше продукция, следовательно выше спрос на нее и ее цена, а следовательно и доход предприятия. Причина высокой стоимости продукции: высокая цена топлива, уникальное его производство, малое число часов работы в год, малое количество отпускаемого продукта. С увеличением заказов государства, увеличится производительность, удельные затраты будут уменьшаться, цена 1 грамма нейтрона будет уменьшаться. Использование таких дорогостоящих установок в современное время необходимо для развития науки.

## 10. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ ИР-8

Объект исследования - исследовательский реактор ИР-8. Имеет высокую плотность потока нейтронов, что используется для исследований в области нанотехнологий, материаловедения, физики твердого тела, ядерной физики и биомедицины. Такая плотность потока является одной из лучших в мире, что говорит о высоком качестве реактора ИР-8.

В данном проекте выбрано решение использования его для проведения опыта по регистрации запаздывающих гамма-квантов деления  $U^{235}$ ,  $Pu^{239}$ .

По потенциальной опасности проектируемый ИЯУ относится ко второй группе – исследовательские реакторы мощностью до 20 МВт., предназначенные для учебных целей, фундаментальных физических исследований и производства радиоактивных изотопов;

Безопасность ИР-8 достигается за счет использования:

- внутренне присущих конструкции свойств самозащищенности;
- эжектора первого контура системы охлаждения реактора, обеспечивающего безопасность реактора при полной потере электропитания;
- пассивных систем безопасности, вступающих в действие при авариях и не требующих операций включения и подвода дополнительной энергии;
- минимум активных систем безопасности, требующих включения дополнительной энергии для работы;
- средств локализации аварии;
- расчётное сопровождение эксплуатации, для качественного обоснования безопасного, экономичного и эффективного проведения работ на ИЯУ [21].

### 10.1. Производственная безопасность

ИР несет потенциальную опасность для населения и окружающей среды в силу ряда специфических особенностей:

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 71   |

- высокая частота переходных режимов при работе (пуски, остановки, изменения мощности в широком диапазоне, динамические эксперименты), при которых чаще всего и происходят нарушения в работе ИЯУ;
- частые перегрузки активных зон и постоянное перемещение облученных изделий на исследования, в бассейны выдержки, на длительное хранение, на утилизацию и т.д.;
- высокая цикличность нагрузок на основное оборудование активных зон и первого контура;
- высокая плотность нейтронного потока в активных зонах исследовательских реакторов, приводящая к повышению вероятности нарушений в работе элементов конструкции активных зон;
- наличие высокообогащенного топлива, что обостряет проблему нераспространения ядерных материалов;
- оснащенность экспериментальными устройствами и связанные с ними особенности эксплуатации;
- меньшее, чем у энергетических реакторов, количество физических барьеров, препятствующих распространению продуктов деления;
- расположение ИЯУ в крупном городе с миллионным населением среди городской застройки [29].

Таблица 20 — Опасные и вредные факторы при проектировании ИЯР ИР-8 и его эксплуатации [30]

| Источник фактора, наименование работ   | Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)   |   | Нормативные документы   |
|--|---|---|---|
|  | Вредные   | Опасные   |   |
| Эксплуатация реактора:<br>1) загрузка и выгрузка топлива,<br>2) управление БЩУ, за<br>3) аварийные ситуации и обращение в отработавшим ядерным топливом. | 1. Монотонность труда;<br>2. Ионизирующее излучение;<br>3. Микроклимат;<br>4. Шум и вибрация;<br>5. ЭМИ;<br>6. Освещение. | 1. Напряженность электрического поля;<br>2. Повышенная температура поверхностей оборудования. | 1. Р 2.2.2006-05 Гигиена труда<br>2. ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ "Средства защиты работающих";<br>3. СанПиН 2.2.4-548-96<br>4. НРБ-99/2009, СанПиН 2.6.1.2523-09;<br>5. ОСПОРБ – 99/2010, СП 2.6.1.2612-10. |



### 10.1.1. Анализ выявленных вредных факторов

#### А. Монотонность нагрузки

Источник возникновения фактора – оператор пульта управления реактора выполняет одну и ту же работу - наблюдает и в случае необходимости нажимает на кнопки.

Природа состояния монотонности - колебания выполнения легкого труда, отрицательно влияет на работоспособность человека и переживается, как неприятное чувство.

Таблица 21 – Нормы классов условий труда по монотонности нагрузки и оценка труда оператора [31]

| Показатели напряженности трудового процесса  | Класс условий труда                |                                     |                  |           | Труд оператора             |
|--|------------------------------------|-------------------------------------|------------------|-----------|----------------------------|
|  | Оптимальный                        | Допустимый                          | Вредный          |           | Вредный                    |
|  | Напряженность труда легкой степени | Напряженность труда средней степени | Напряженный труд |           | Напряженный труд 2 степени |
|  |                                    |                                     | 1 степени        | 2 степени |                            |
| 1. Число элементов (приемов), необходимых для реализации простого задания или в многократно повторяющихся операциях            | более 10                           | 9-6                                 | 5-3              | менее 3   | менее 3                    |
| 2. Продолжительность (в с) выполнения простых заданий или повторяющихся операций   | более 100                          | 100-25                              | 24-10            | менее 10  | менее 10                   |
| 3. Время активных действий (в % к продолжительности смены). В остальное время - наблюдение за ходом производственного процесса | 20 и более                         | 19-10                               | 9-5              | менее 5   | менее 5                    |
| 4. Монотонность производственной обстановки (время пассивного наблюдения за ходом техпроцесса в % от времени смены)            | менее 75                           | 76-80                               | 81-90            | более 90  | более 90                   |

Предлагаемые средства защиты: сокращенная рабочая неделя (не более 36 ч) для вредных условий труда 3-й (ст. 92 ТК РФ).

### В. Ионизирующее излучение (ИИ)

Источник возникновения фактора – загрузка в активной зоне реактора ионизирующих источников: урана 235, искусственного источника излучения, образование в процессе работы реактора нейтронного излучения, гамма-излучения,  $\alpha$ - $\beta$ - излучения. Радиоактивные отходы и отработанное ядерное топливо.

Природа фактора - любое излучение, взаимодействует с веществом, что приводит к образованию электрических зарядов. Изменения, происходящие в организме под действием радиации, могут проявиться в виде детерминированных и стохастических биологических эффектов.

Таблица 22 - Основные пределы доз ионизирующего излучения для категорий лиц [32]:

| Нормируемые величины  | Дозовые пределы   |  |
|---|---|--|
|   | Персонал (группа А)<br>(Для группы Б не должны превышать $\frac{1}{4}$ значений группы А) | Население  |
| Эффективная доза  | 20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год          | 1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год |
| Эквивалентная доза за год:<br>в хрусталике<br>коже<br>кистях и стопах | 150 мЗв<br>500 мЗв<br>500 мЗв   | 15 мЗв<br>50 мЗв<br>50 мЗв   |

Эффективная доза облучения критической группы А персонала превышает 150 мкЗв.

Способами защиты от ИИ являются:

- расстояние от радиоактивных источников;
- сокращение времени работы с ИИ;
- нахождение вдали от ИИ вне рабочего времени;
- использование средств индивидуальной защиты;
- поддержание чистоты на рабочем месте и используемого инструмента.

Основной комплект СИЗ должен включать: комбинезон или костюм (куртка, брюки), халат, спецобувь, нательное белье, шапочку или шлем,

носки и перчатки. Кроме того, в санпропускнике, для перемещения в его пределах, должны выдаваться сандалии, а также носовые платки разового использования, мыло, полотенца, мочалки из синтетических материалов.

Защита на реакторе ИР-8 производится с помощью систем радиационного контроля:

- специальных и рабочих помещений;
- аэрозолей в рабочих помещениях;
- загрязненных поверхностей;
- экспериментальных каналов в реакторном зале.

Для проведения измерений радиационного контроля на ИР используется дозиметрическое оборудование: дозиметры ДРГ-05, ДРГ-01Т1, прибор ДКС-96, установка «УМФ». Для индивидуального контроля: дозиметры КИД-2 и ТДЛ, индикатор ИФКУ. В служебных и рабочих помещениях, реакторном зале – измерители скорости счета УИМ2-2 с датчиками БДМГ-41. Внутрореакторный контроль - ионизационные камеры КНТ [21].

#### С. Микроклимат.

Источник возникновения фактора – энергозатраты организма 151 – 200 ккал/ч, связанные с постоянной ходьбой, перемещением мелких (до 1 кг) изделий или предметов в положении стоя или сидя и требующие определенного физического напряжения, при работе в реакторном зале.

Физическая природа – изменение температуры воздуха и теплового излучения.

Таблица 23 — Допустимые параметры микроклимата на рабочих местах производственных помещений при относительной влажности воздуха в диапазоне 15..75% [33]

| Период года | Категория работ | Температура воздуха, °С | Температура поверхностей, °С | Скорость движения воздуха, м/с |
|-------------|-----------------|-------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Холодный    | II а            | 17...23                 | 16...24                      | 0,1...0,3                      |
| Теплый      | II а            | 18...27                 | 14...27                      | 0,2...0,5                      |

Работа в реакторном помещении относится к категории II а.

Таблица 24 — Допустимые величины интенсивности теплового облучения поверхности тела работающих от производственных источников [33]

| Облучаемая поверхность тела, % | Интенсивность теплового облучения, Вт/м, не более |
|--------------------------------|---|
| 50 и более                     | 35  |
| 25-50                          | 70  |
| менее 25                       | 100   |

Допустимые величины интенсивности теплового облучения работающих от источников излучения, нагретых до белого и красного свечения не должны превышать  $140 \text{ Вт/м}^2$ . При этом облучению не должно подвергаться более 25% поверхности тела.

Температура воздуха на рабочих местах не должна превышать  $22^\circ\text{C}$  - при категории работ Па, при наличии источника теплового излучения. На реакторе ИР-8 интенсивность теплового излучения не превышает допустимой нормы.

Средства защиты: на ИР предусмотрены общеобменные вентиляции и спецвентиляции - отдельно вентилируются зоны строгого режима и зоны свободного режима. Отопление помещений - воздушное, совмещенное с приточной вентиляцией. В целях профилактики неблагоприятного воздействия микроклимата должны быть использованы защитные мероприятия: воздушное душирование, компенсация неблагоприятного воздействия одного параметра микроклимата изменением другого, спецодежда и другие средства индивидуальной защиты, помещения для отдыха и обогрева, регламентация времени работы, в частности, перерывы в работе, сокращение рабочего дня, увеличение продолжительности отпуска, уменьшение стажа работы.

#### Д. Шум и вибрация.

Источниками шума и вибрации на БЩУ является работа компьютеров и вентиляции. Шум – это беспорядочные колебания различной физической природы, отличающиеся сложностью временной и спектральной структуры. Вибрация - механические колебания, оказывающие ощутимое влияние на человека.

Допустимый уровень шумов для операторских помещений 60 дБА. Основными способами борьбы с шумами, помимо мер по уменьшению шума самих источников являются удаленность от объекта управления при трех закрытых дверях и звукоизоляция помещения. Необходимо не допускать возникновения источников шума внутри помещений щитов управления. В соответствии с [34] в операторной категории вибрации приведена в таблице 25.

Таблица 25 — Категория вибрации, характеристика условий труда

| Категория вибрации по санитарным нормам и критерий оценки | Характеристика условий труда  |
|---|---|
| 3 тип «В» комфорт   | Вибрация на рабочих местах работников умственного труда и персонала, не занимающегося физическим трудом |

Меры защиты: уменьшение уровня шума и вибрации в источнике их возникновения; рациональное размещение оборудования; борьба с ними на путях их распространения, в том числе изменение направленности излучения шума и вибрации, использование средств звукоизоляции, звукопоглощение и установка глушителей шума, в том числе акустическая обработка поверхностей помещения, вибродемпфирующие покрытия, виброгасящие фундаменты, виброизоляторы из резины, пробки, войлока, асбеста, стальных пружин.

#### Е. Электромагнитное излучение.

Источники возникновения: гамма-излучение, образующееся в процессе работы реактора; рентгеновское излучение испускаемое детекторам, использующимися для регистрации частиц, радиосвязь между оператором и обходчиками, организация беспроводных компьютерных сетей, инфракрасное излучение приборов.

Природа фактора – колебания электрического и магнитного полей, которые распространяются в вакууме со скоростью света.

Таблица 26 - Классы условий труда при действии электромагнитных полей [31]

| Фактор   | Класс условий труда  |                   |                |           |        |     |                    |
|--|----------------------|-------------------|----------------|-----------|--------|-----|--------------------|
|  | Оптимальный          | Допустимый        | Вредный - 3    |           |        |     | Опасный (экстрем.) |
|  | 1                    | 2                 | 3.1            | 3.2       | 3.3    | 3.4 | 4                  |
|  | Превышение ПДУ (раз) |                   |                |           |        |     |                    |
| Магнитные поля промышленной частоты (50 Гц)              | естественный фон     | $\leq \text{ПДУ}$ | $\leq 5$       | $\leq 10$ | $> 10$ | -   | -                  |
| Электромагнитные поля на рабочем месте пользователя ПЭВМ | -                    | $\leq \text{ВДУ}$ | $> \text{ВДУ}$ | -         | -      | -   | -                  |

Таблица 26.1 – ПДУ энергии ЭМП диапазона частот 30 кГц -330 ГГц [35]

|                           | Максимально допустимые уровни в диапазонах частот (МГц) |      |       |        |                         |
|---------------------------|---|------|-------|--------|-------------------------|
|                           | 0,03-3  | 3-30 | 30-50 | 50-300 | 300-300000              |
| Е, В/м                    | 500   | 300  | 80    | 80     | -                       |
| ППЭ, мкВт/см <sup>2</sup> |   |      |       |        | 1000,<br>5000 (для рук) |

Основной вклад в ЭМИ реактора ИР-8 имеет гамма-излучение, его уровни энергии строго контролируются в процессе эксплуатации и не превышают 1000 МГц, что соответствует допустимому классу условий труда.

Защита от ЭМИ: применение экранов с против-ЭДС и защит, максимально задерживающих излучение. Максимальное сокращение времени пребывания и перерывы в работе с возможностью выхода из помещения с высоким ЭМИ.

#### Г. Освещение.

Источники возникновения: отсутствие возможности организации естественного освещения, из-за расположения операторной в окружении бетонной защиты.

Природа фактора – корпускулы света - фотоны, излучаются источником света в виде волн, распространяющихся с постоянной скоростью порядка 300 тыс.км/с.

Таблица 27- Классы условий труда в зависимости от параметров световой среды [31]

| Фактор, показатель | Класс условий труда |             |           |
|--------------------|---------------------|-------------|-----------|
|                    | допустимый          | вредный - 3 |           |
|                    |                     | 1 степени   | 2 степени |
|                    | 2                   | 3,1         | 3,2       |
| 1                  | 2                   | 3           | 4         |

Продолжение табл. 27

| Естественное освещение:   |                           |            |                     |            |
|---|---------------------------|------------|---------------------|------------|
| Коэффициент естественной освещенности КЕО, %                            |                           | $\geq 0,5$ | 0,1-0,5             | $< 0,1$    |
| Искусственное освещение:  |                           |            |                     |            |
| Освещенность рабочей поверхности (Е, лк) для разрядов зрительных работ: | I-III, А, Б1              | Ен         | $0,5Ен \leq E < Ен$ | $< 0,5 Ен$ |
|   | IV-XIV, Б2, В, Г, Д, Е, Ж | Ен         | $< Ен$              |            |
| Прямая блескость  |                           | Отсутствие | Наличие             |            |
| Коэффициент пульсации освещенности (Кп, %)                              |                           | Кпн        | $> Кпн$             |            |

$E_n = 200$  лк, для рабочего места оператора [36].

$K_{пн} = 20$ , для работ средней-высокой точности [37].

Рабочее место оператора оценено по факторам естественного и искусственного освещения 1/3 и определен класс - вредный 3,1 из-за отсутствия естественного освещения.

Средства защиты: постоянное необходимое обеспечение местного освещения: со стационарными светильниками, устройствами для подключения переносных светильников и ламп-прожекторов.

### 10.1.2. Анализ выявленных опасных факторов

#### А. Напряженность электрического поля.

Источники возникновения: все оборудование и несущие конструкции – металлические, проводящие электрический ток.

Природа фактора - электрическое поле действует на внесенный в него заряд  $q$  с некоторой силой  $F$ , отношение силы к заряду и есть напряженность электрического поля.

Предельно допустимый уровень напряженности воздействующего электрополя (ЭП) установлен равным 25 кВ/м [36].

Рассчитаем допустимый уровень напряженности ЭП на месте работника оператора реакторного зала ИР-8:

$$E_{np} = \frac{50}{T + 2} = \frac{50}{7,2 + 2} = 5,44 \text{ кВт/м};$$

где  $T$  – допустимое время пребывания в ЭП, ч. В первом приближении мы приняли равным рабочему времени оператора.

Время работы оператора за пультом в соответствии с вредными условиями труда, сокращенной рабочей неделей [37]:

$$t_{\text{раб}} = \frac{T_{\text{нед}}}{5} = \frac{36}{5} = 7,2 \text{ ч.}$$

Допустимое время пребывания в ЭП напряженностью свыше 5 до 20 кВ/м включительно не должно превышать 8 часов.

Пребывание в ЭП напряженностью до 5 кВ/м включительно допускается в течение рабочего дня. Допустимое время пребывания в ЭП может быть реализовано одноразово или дробно в течение рабочего дня. В остальное рабочее время напряженность ЭП не должна превышать 5 кВ/м.

В нашем случае, напряженность ЭП при пребывании около пульта составляет до 3 кВт/м. Нужно учесть, что оператор помимо управления в операторной, может еще проводить осмотр реакторного зала, напряженностью до 20 кВт/м и ограниченным временем пребывания 10 мин. При нахождении оператора в течение рабочего дня в зонах с различной напряженностью ЭП время пребывания вычисляют по формуле [36]:

$$T_{\text{пр}} = 8 \left( \frac{t_{E1}}{T_{E1}} + \dots + \frac{t_{En}}{T_{En}} \right) = 8 \left( \frac{7}{7,2} + \frac{10 / 60}{10 / 60} \right) = 15,8$$

где  $T_{\text{пр}}$  - приведенное время, эквивалентное по биологическому эффекту пребыванию в ЭП нижней границы нормируемой напряженности, ч;

$t_{E1..n}$  - время пребывания в контролируемых зонах с напряженностью  $E_{1..n}$ , ч;

$T_{E1..n}$  - допустимое время пребывания в ЭП для соответствующих контролируемых зон.

В операторной:

$$E_1 = 3 \text{ кВт/м,}$$

$$E_1 \leq 5 \text{ кВт/м,} \rightarrow T_{E1} = t_{\text{раб}} = 7,2 \text{ ч}$$

$$t_{E1} = 7,2 - \frac{10}{60} = 7 \text{ ч.}$$

В реакторном зале:

$$E_2 = 20 \text{ кВт/м, } T_{E2} = \frac{10}{60} \text{ ч } \quad t_{E2} = \frac{10}{60} \text{ ч.}$$

Приведенное время пребывания в зонах оказалось больше рабочего времени. Поэтому нагрузку распределять между вторым и первым

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 80   |



оператором или находиться только в пультовой, где напряженность соответствует продолжительности рабочего дня.

Таблица 28- Классы условий труда при действии электрических полей [31]

| Фактор  | Класс условий труда  |                   |             |           |        |     |                    |
|---|----------------------|-------------------|-------------|-----------|--------|-----|--------------------|
|   | Оптимальный          | Допустимый        | Вредный - 3 |           |        |     | Опасный (экстрем.) |
|   | 1                    | 2                 | 3.1         | 3.2       | 3.3    | 3.4 | 4                  |
|   | Превышение ПДУ (раз) |                   |             |           |        |     |                    |
| Электрические поля промышленной частоты (50 Гц) | естественный фон     | $\leq \text{ПДУ}$ | $\leq 5$    | $\leq 10$ | $> 10$ | -   | $> 40$             |

Операторная относится к помещениям с допустимым классом условий труда по воздействию электрического поля. Но нахождение там несет большую опасность удара электрическим током.

Классификация помещений по степени опасности поражения электрическим током

ПУЭ определяют в отношении опасности поражения людей электрическим током следующие классы помещений:

1. Помещения без повышенной опасности.
2. Помещения с повышенной опасностью, характеризующиеся наличием в них одного из следующих условий, создающих повышенную опасность:
  - a. сырости (влажность более 75 %) или токопроводящей пыли;
  - b. токопроводящих полов (металлические, земляные и т.п.);
  - c. высокой температуры (выше 35 °C);
  - d. возможности одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам и т.п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования - с другой.
3. Особо опасные помещения, характеризующиеся наличием одного из следующих условий, создающих особую опасность:
  - a. особой сырости;
  - b. химически активной или органической среды;
  - c. одновременно двух или более условий повышенной опасности.

Граничные значения напряжений, при превышении которых требуется выполнение защиты от косвенного прикосновения в зависимости от категории помещения.

Таблица 28.1 - Граничные значения напряжений [39]

| Категория помещений | ПУЭ               |
|---------------------|-------------------|
| 1                   | >50 В перем. тока |
|                     | >120 В пост. тока |
| 2,3                 | >25 В перем. тока |
|                     | >60 В пост. тока  |

Операторная относится к классу помещений без повышенной опасности поражения электрическим током: >50 В переменного тока и >120 В постоянного тока.

Защитные меры: уменьшение времени пребывания, изоляция электропроводящих поверхностей, средства индивидуальной защиты.

#### В. Повышенная температура поверхностей оборудования.

Может привести к травмам кожных покровов или возникновению пожара. Источники: выделение тепловой энергии в процессе эксплуатации реактора, нагревание рабочих частей и оборудования высокой мощности и частоты работы.

Источники пожара: возгорание в системе газоудаления, масляных системах, системе электрических кабелей, на дизель-генераторах, трансформаторах, фильтрах. Источниками пожаров являются взрыв газа, короткое замыкание электрических кабелей, попадание масла на горячие участки оборудования, ошибки персонала при обращении с огнем в процессе ремонтных работ, проверок систем.

Природа пожара - неконтролируемое горение вне специального очага, наносящее материальный ущерб.

Для естественно не продуваемых помещений, оборудование, имеющее температуру внешней поверхности более 75 °С, необходимо изолировать. Температура поверхности тепловой изоляции не должна превышать 40 °С [40].

Для реактора ИР-8 предусмотрена тепловая изоляция трубопроводов и бетонная защита корпуса реактора.

Для предотвращения пожара предусматриваются следующие меры [41]:

- использование при проектировании ИР главным образом негорючих или огнестойких материалов;
- проектирование и сооружение систем таким образом, чтобы их работа или выход из строя не приводили к пожару;
- исключение из зоны, где находятся важные для безопасности системы, горючих материалов или использование и хранение их под строгим контролем;
- проведение под строгим контролем всех работ, способных вызвать пожар (сварочные работы и др.).

## **10.2. Экологическая безопасность**

### **10.2.1. Защита селитебной зоны**

Реактора ИР-8 проектируем и строим на территории томской области.

Действующий ИР I категории должен быть расположен на расстоянии не менее 1000 м от жилых зданий [42]. Размер зоны наблюдения устанавливается в соответствии со специальными методическими указаниями по согласованию с ЦГСЭН.

Для уменьшения радиационного воздействия на население и окружающую среду предусматривается биологическая защита, включающая в себя двустенный бак (нержавеющая сталь, алюминий), водную защиту и блоки сухой защиты (бетон).

Эффективная доза облучения критической группы населения от выброса активности в окружающую среду на всех расстояниях от ПЭБ не превышает 150 мкЗв. Таким образом, максимальные дозы облучения населения значительно ниже допустимых уровней, при которых, в соответствии с [32], требуется проведение защитных мероприятий по ограничению облучения населения.

### 10.2.2. Анализ воздействия на атмосферу

Основными загрязнителями при работе ИР-8 являются газо-аэрозольные выбросы – радиоактивный воздух из экспериментальных каналов, газообразные продукты деления урана, выходящие из теплоносителя. В выбросах зарегистрированы радионуклиды:  $Ar^{41}$ ,  $Xe^{135}$ ,  $Kr^{87,88}$ ,  $I^{131}$ ,  $Rb^{88}$  [21].

Максимальные выбросы загрязняющих веществ в атмосферу имеют место в период максимума суммарной нагрузки, обеспечиваемой при одновременной работе дизель-генератора и вспомогательной котельной установки. Для уменьшения токсического воздействия дымовых газов и продуктов сгорания в дымовой трубе предусмотрены специальные фильтры, обеспечивающие сбор сажистых и зольных составляющих с последующим их вывозом на утилизацию.

### 10.2.3. Анализ воздействия на гидросферу

Для функционирования реактора, отвода тепла, охлаждения элементов, и обеспечения необходимого запаса воды организуется искусственное водохранилище. Забор воды производится на территории томской области, что уменьшает ее ресурсы. После прохождения полного цикла рабочая вода очищается, охлаждается в пруде и опять поступает на реактор. Это позволяет экономично расходовать природные запасы.

ЖРО по системе спецканализации удаляются из реактора и хранятся в резервуарах из нержавеющей стали, заглубленных в грунт на территории промплощадки до переработки. Срок хранения рассчитан, чтобы не наступило разрушение резервуаров и проникновение радиоактивности в почву.

### 10.2.4. Анализ воздействия на литосферу

В процессе работы реактора, образуются ТРО и ОЯТ. Имеются несколько вариантов обращения с ними:

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 84   |

ОЯТ: временное хранение на поверхности в бочках, захоронение в грунте или переработка.

ТРО: временное хранение на поверхности или в грунте, сжигание, остекление и хранение, захоронение.

Сейчас в России обращение с ОЯТ происходит методом: временного хранения. ТРО временно хранятся в хранилищах до вывоза в могильники [21].

Это значительно воздействует на литосферу - разрушение породы вследствие выкапывания огромных хранилищ, а при вгонке в скальные и морские породы ОЯТ на большую глубину породы становится радиоактивной. Изменение литосферы так же имеет место при добыче топлива – урана в шахтах. При обогащении его всего лишь 1% добытой руды используется, остальное идет в отвал.

#### **10.2.5. Решения по обеспечению экологической безопасности**

Установить для каждого источника загрязнения атмосферы предельно допустимый выброс вредных веществ в атмосферу (ПДВ) при условии, что выбросы вредных веществ от данного источника, не создадут приземную концентрацию, превышающую их предельно допустимые концентрации (ПДК) для населения, растительного и животного мира [43].

Предельно допустимый выброс радионуклидов в окружающую среду для предприятий атомной промышленности – 0,20 МЗв/год [32]. Реактор ИР-8 работает в пределах этой нормы.

При использовании водных объектов необходимо проводить комплекс мероприятий по предотвращению их загрязнения, засорения и истощения. Состав и свойства вод должны соответствовать установленным требованиям и нормативам. Должны осуществляться мероприятия по охране вод и быть обеспечена замкнутая система водоснабжения. Не осуществлять сброс сточных вод, технологических и бытовых отходов в поверхностные воды. Сточные воды, подлежащие сбросу в канализационную сеть, содержащие вредные вещества в концентрациях, превышающих установленные нормы,

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 85   |

следует подвергать предварительной очистке. В целях предотвращения загрязнения поверхностных вод, используемых для централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения, устанавливают зоны санитарной охраны [44].

Для обеспечения экологической безопасности почв необходимо осуществлять [45]:

утилизацию и захоронение выбросов, сбросов, отходов, стоков и осадков сточных вод с соблюдением мер по предотвращению загрязнения почв. Основными критериями, используемыми для оценки степени загрязнения почв, должны быть предельно допустимые количества (ПДК) и ориентировочные допустимые количества (ОДК) химических веществ в почве по [46], нормативы допустимых количеств загрязняющих веществ в смежных природных средах и в сельскохозяйственной продукции, показатели санитарного состояния почв по [47].

Почвы, отнесенные к категории загрязненных, должны находиться под постоянным контролем внутриведомственных и государственных служб контроля. При проведении контроля за загрязнением почв следует учитывать класс опасности химических веществ по [48].

На реакторе ИР-8 ограничен нормами сброс радионуклидов в окружающую среду – менее 0,05 МЗв/год [32]. Выбраны постоянные точки наблюдения за окружающей средой в зоне наблюдения. Отбор почвы и растительности проводится 2 раза в год, отбор снега 1 раз в год - в марте [21].

### **10.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

При разработке и эксплуатации реактора ИР-8 могут возникнуть чрезвычайные ситуации (ЧС) [49]:

Стихийные бедствия: ураганы, смерчи, снежные заносы, пожары, паводки, наводнения, оползни, землетрясения.

Техногенные - выход из строя машин, механизмов и агрегатов в момент их эксплуатации: отказ регулирующих стержней – неконтролируемый выход радиоактивности реактора, как следствие взрыв;

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 86   |

отказ частей контура: насосов, трубопроводов - ухудшение теплосъема, разрыв трубопроводов, выход радиоактивной воды за предел контура, остановка реактора.

Экологические ЧС – деградация почвы, из-за разрушения и истощения пород, закачкой ОЯТ, использование плодородных земель для производства; загрязнение атмосферы дымовыми и радиоактивными веществами в случае аварии, загрязнение и истощение водных ресурсов при неконтролируемых действиях персонала.

Социально опасные явления: терроризм, общественные беспорядки.

Военные ЧС - разрешение государственных конфликтов и использованием ядерного оружия.

Наиболее вероятная ЧС – техногенного характера, выход из строя реактора - ядерный взрыв.

Поражающие факторы: ударная волна, световое излучение, проникающая радиация, электромагнитное излучение, радиоактивное заражение местности.

Для предупреждения взрыва необходимо исключить:

- образование взрывоопасной среды;
- возникновение источника инициирования взрыва.

Взрывоопасная среда – неконтролируемо делящийся уран. Источник – реактор, оставшийся без возможности регулирования.

Меры по взрывопреждению реактора [45]:

- контроль за ходом технологического процесса,
- дублирующие защитные элементы оборудования (задвижки, клапаны, байпасы, набор стержней)
- самозащищенность реактора,
- автоматическая защита реактора,
- обученный высококвалифицированный персонал,

Персонал должен знать:

- основные правила поведения при авариях, уметь действовать в

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 87   |

сложившейся обстановке;

- маршрут и порядок следования в убежище в случае аварии, пути выхода в безопасные места, организацию обеспечения средствами индивидуальной защиты;

- регулярно проверять все функционирующие системы,

На предприятии должен быть:

- разработан план ликвидации возможной аварий,

- организована подготовка рабочих и служащих к работе при аварийных ситуациях, предусматривается необходимый резерв сил и средств для их ликвидации.

- необходимо содержать в постоянной готовности системы и средства оповещения, иметь на рабочих местах необходимое количество средств индивидуальной защиты.

Действия в результате ЧС и меры по ликвидации последствий:

- оповещение об аварии управление и персонал предприятия;

- вызвать спасательную команду,

- использовать индивидуальные меры защиты, скрыться с места ЧС в укрытие.

Принимаемые меры:

- оповещение и эвакуация населения,

- локализация очага аварии,

- замедление хода нерегулируемой цепной реакции путем сбросов реагентов, уменьшающих реактивность;

- снижение разогрева топлива;

- консервация реактора,

- контроль за выбросами и уровнем радиации.

#### **10.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

##### **10.4.1. Правовые нормы трудового законодательства**

Для работников атомной отрасли предполагается специальная оценка условий труда (СОУТ). Лица обслуживающие реактор, работающие с

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 88   |



открытыми и закрытыми ионизирующими источниками относятся к персоналу группы А с вредными или опасными условиями работы, в зависимости от выполняемых заданий. Им гарантированы:

1) Доплаты (ст.147 ТК РФ [38]):

Оплата труда работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, устанавливается в повышенном размере - 4% тарифной ставки (оклада), установленной для различных видов работ с нормальными условиями труда.

2) Надбавки и скидки к страховым взносам в ФСС России (ст.22 [51])

3) Дополнительный отпуск (ст. 117 ТК РФ[38]):

Минимальная продолжительность ежегодного дополнительного оплачиваемого отпуска работникам, составляет 7 календарных дней. Часть ежегодного дополнительного оплачиваемого отпуска, может быть заменена отдельно устанавливаемой денежной компенсацией.

4) Сокращенная рабочая неделя (ст. 92 ТК РФ[38]) – не более 36 часов в неделю.

5) Молоко и лечебно-профилактическое питание (ст. 222 [38]). Работникам выдаются бесплатно по установленным нормам молоко или другие равноценные пищевые продукты. Выдача может быть заменена компенсационной выплатой в размере, эквивалентном стоимости молока или других равноценных пищевых продуктов.

На работах с особо вредными условиями труда предоставляется бесплатно по установленным нормам лечебно-профилактическое питание.

6) Медосмотры (ст. 213 [38])

Работники, занятые на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, проходят обязательные предварительные (при поступлении на работу) и периодические медицинские осмотры.

7) Обеспечение СИЗ (ст. 221 [38])

Работникам бесплатно выдаются прошедшие обязательную сертификацию или декларирование соответствия специальная одежда,

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 89   |

специальная обувь и другие средства индивидуальной защиты, а также смывающие и (или) обезвреживающие средства в соответствии с типовыми нормами.

Работодатель за счет своих средств обязан в соответствии с установленными нормами обеспечивать своевременную выдачу специальной одежды, специальной обуви и других средств индивидуальной защиты, а также их хранение, стирку, сушку, ремонт и замену.

8) Дополнительные страховые взносы в ПФР, дифференцированные тарифы в зависимости от класса условий труда (ч.2.1 ст. 58.3 [52]).

9) Досрочная пенсия по возрасту [53]. Мужчинам по достижении возраста 50 лет и женщинам по достижении возраста 45 лет, если они проработали соответственно не менее 10 лет и 7 лет 6 месяцев на работах с вредными условиями труда.

4.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны оператора пульта управления (ПУ) реактором

Наличие широкого спектра пультов управления с графическими дисплеями – для предоставления оперативного протокола событий, диагностической и справочной информации. Сохраняются пульты и панели с индивидуальными средствами контроля и управления, панели электрической части энергоблока и панели системы противопожарной безопасности. Для представления оперативному персоналу обобщенной информации о технологическом процессе и состоянии безопасности - перед дисплейными пультами операторов устанавливается экран коллективного пользования. Для каждого оператора предусматривается рабочая зона с необходимыми средствами контроля и управления с учетом того, что операторы работают сидя. Возможность пересечения пути передвижения операторов при выполнении ими своих заданий минимальна.

Дисплеи систем безопасности используются для контроля работоспособности каналов систем безопасности. Для каждого канала безопасности предусматривается собственный дисплей.

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 90   |

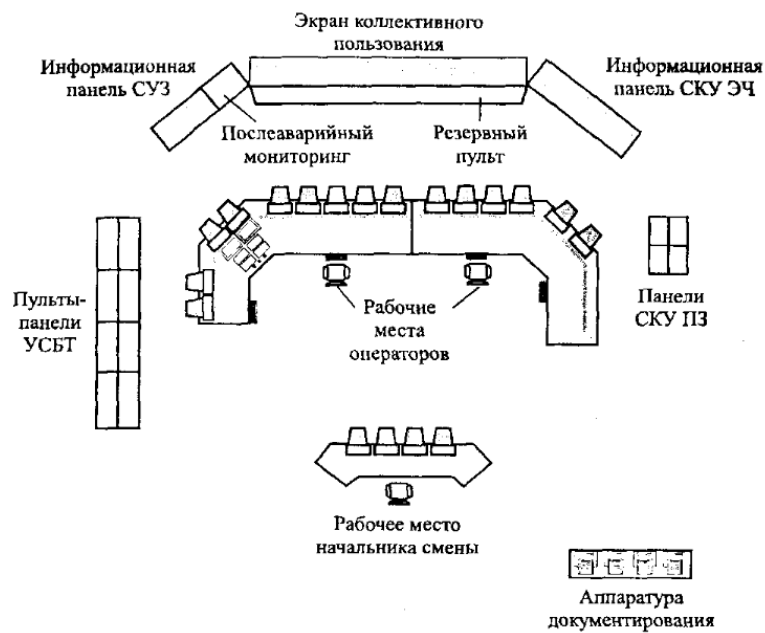


Рисунок 11 – Организация пульта управления реактором ИР-8

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе поставлены задачи разработки системы регистрации запаздывающих гамма-квантов при делении  $U^{235}$ ,  $Pu^{239}$  и выбора источника тепловых и быстрых нейтронов. Научный и практический интерес представляет уточнение результатов работы, полученных на тепловом реакторе TRIGA[1].

Основные характеристики предстоящего эксперимента определялись в два этапа.

I. Экспериментально-теоретические исследования, проведенные на базе РФЯЦ ВНИИТФ г. Снежинск, позволили:

- выбрать полупроводниковый германиевый детектор с наилучшей эффективностью регистрации ожидаемых линий  $\varepsilon_{\gamma} = 0,0069 \text{ имп / квант}$ ,
- определить оптимальную геометрию расположения компонентов эксперимента  $R = 100 \text{ см}$ ,
- оценить необходимые плотности потоков тепловых и быстрых нейтронов источника – не менее  $1,1 \cdot 10^8 \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и  $5,2 \cdot 10^{10} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Анализ полученных данных показал возможность достаточно эффективной и безошибочной регистрации мгновенных гамма-квантов с более высокой плотностью потока тепловых нейтронов, чем полученных на реакторе TRIGA[1].

II. Проектирование источника нейтронов проведено на кафедре Атомных и тепловых электростанций.

Исходя из оцененных значений необходимых плотностей потоков, в качестве источника нейтронов выбран реактор ИР-8, имеющий плотность потока нейтронов порядка  $10^{14} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  [2].

Проведены тепловой, нейтронно-физический и конструкторский расчеты, в результате которых получены необходимые характеристики источника нейтронов типа ИР-8:

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 92   |

- плотность быстрых и тепловых нейтронов  $8,67 \cdot 10^{13} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  ,  
 $2,29 \cdot 10^{13} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  ,
- наличие горизонтального канала для проведения эксперимента с образцами делящегося материала диаметром 15 мм,
- возможность непосредственной установки детектора запаздывающих  $\gamma$ -квантов у поверхности образца,
- работа на мощности реактора для проведения эксперимента должна быть не менее 3 часов для набора необходимой статистики регистрации гамма-квантов.

При проведении теплового расчета источника нейтронов впервые использованы уточненные данные коэффициента теплопроводности алюминиевого сплава САВ-1, основного материала оболочки и матрицы топлива [23].

Нейтронно-физический расчет реактора проведен на ТВС с обогащением 90%. Значения полученных плотностей потоков нейтронов в сравнении с необходимыми значениями создают запас порядка  $10^3$ - $10^5$ , который дает возможность вариации геометрии проведения эксперимента и размеров образца.

Конверсия ИРТ на низкообогащенное топливо с содержанием 19,75%  $U^{235}$  приведет к снижению плотности потока тепловых нейтронов примерно на 37 % (но при этом уменьшатся затраты на использование топлива в 1,5 раз) [23]. Очевидно, перевод ректора на новое топливо не скажется на требуемом обеспечении эксперимента.

Результаты экспериментальных исследований, расчетного обоснования проведения опыта и необходимости проектирования источника были представлены на семинаре научно исследовательского отдела в г. Снежинке и на VII Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» в г. Томске.

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 93   |

Помимо основной задачи, решался ряд других: в разделе финансового менеджмента рассчитаны технико-экономические показатели и срок окупаемости проекта данного ИР; в разделе социальной ответственности рассмотрены аспекты безопасной эксплуатации ИР; в разделе автоматики разработана функциональная схема автоматического регулирования мощности реактора ИР.

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 94   |

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Neutron Age Determination in Fast Reactor Materials using the Group Method [Electronic resource] / M. A. Kabanova [et al.] // MATEC Web of Conferences. — Les Ulis: 2016. — Vol. 72 : Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy – Technical and Technological Equipment (HMTTSC-2016). — [01040, 8 p.]. — <http://dx.doi.org/10.1051/matecconf/20167201040> <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/33438>
2. Кабанова, М. А. Определение возраста нейтронов в материалах быстрых реакторов [Электронный ресурс] = Determination the age of neutrons in materials of the fast reactors / М. А. Кабанова, А. В. Кузьмин, А. В. Южаков; науч. рук. А. В. Кузьмин // Современные техника и технологии : сборник трудов XXI международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 5-9 октября 2015 г. в 2 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — 2015. — Т. 2. — [С. 129-131]. — <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C01/V2/038.pdf>
3. Кабанова, М. А. Расчет возраста нейтронов деления до индиевого резонанса в натрия методом групп [Электронный ресурс] / М. А. Кабанова, А. В. Кузьмин // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность : материалы XX Всероссийской научно-технической конференции, 2-4 декабря 2014 г., Томск в 2 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) [и др.] ; ред. кол. В. В. Литвак [и др.]. — 2014. — Т. 2. — [С. 38-41]. — <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2014/C15/V2/012.pdf>
4. Кабанова, М. А.. Перспективные реакторы: исследование активных зон [Электронный ресурс] / М. А. Кабанова; науч. рук. С. В. Лавриненко // Интеллектуальные энергосистемы труды III Международного молодёжного форума, 28 сентября - 2 октября 2015 г., г. Томск: в 3 т.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) . — 2015 . — Т. 2. — [С. 92-95] — [Библиогр.: с. 95 (2 назв.)]. — <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C43/V2/023.pdf>
5. Кабанова, М. А.. Die stabilität des atomreaktors [Elektronische Ressource] / М. А. Кабанова // Язык и мировая культура: взгляд молодых исследователей сборник материалов XV Всероссийской научно-практической конференции, г. Томск, 24-27 апреля 2015 г.: в 3 ч.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; под ред. Н. А. Качалова [и др.] . — 2016 . — Ч. 3. — [С. 161-163] . — [Библиогр.: с. 163 (2 назв.)]. — <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/32431>
6. VII Всероссийская научная конференции с международным участием «ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ», 26.10.2016г. «РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ СОСТАВА ТОПЛИВА МЕТОДОМ РЕГИСТРАЦИИ ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ ГАММА-КВАНТОВ ДЕЛЕНИЯ», г. Томск, Кабанова М.А., Кузьмин А.В., Костенко И.И.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Isomeric gamma rays from  $^{235}\text{U}(n, f)$  and  $^{239}\text{Pu}(n, f)$  for times less than 1  $\mu\text{sec}$  after fission [Текст] / R.E. Sund, Hans Weber, V.V. Verbinski // Physical Review C. – 1974. – V. 10. – N. 2. – P. 853-870.
2. Рязанцев Е. П., Насонов В.А., Егоренков П.М., и др. Современное состояние и перспективы использования реактора ИР-8 РНЦ «КИ». Материалы международной научно-технической конференции «Исследовательские реакторы в XXI веке». Москва 20-23 июня 2006 г., изд. ГУП НИКИЭТ, 2006.
3. Песня Ю.Е. Расчетное обеспечение экспериментальных исследований на реакторе ИР-8 с использованием прецизионной программы MCU-PTR: диссертация к.т.н. Национального исследовательского центра «Курчатовский Институт», Москва-2015.
4. Бушуев А.В., Петрова Е.В., Кожин А.Ф. Практическая гамма-спектрометрия: Учебное пособие. М.: МИФИ, 2006. – 124с.
5. Дуглас Райли, Норберт Энслин, Хэйстингс Смит, мл., Сара Крайнер Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов: Пер. с англ. – М.: ЗАО "Издательство Бином", 2000. – 720 с.
6. Спектрометрическая система Genie 2000 версия 2.1. Руководство пользователя. Редакция 1.0, декабрь 2002г. Canberra Industries.
7. MAESTRO-32 Эмулятор МКА для Microsoft Windows 98, 2000 и XP A65-B32. Руководство пользователя для версии программы 6.0.
8. Maienschein F.C. Gamma Rays Associated with Fission [Текст] / F.C. Maienschein, R.W. Peelle, W. Zobel. Proceedings of the Second United Nations International Conference on the Uses of Atomic Energy. V. 15 – Geneva, Switzerland, 1958. – P. 366.
9. Г.А. Бать, А.С. Коченов, Л.П. Кабанов. Исследовательские ядерные реакторы: Учеб. пособие для вузов – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 280 с.
10. Абдукадырова И.Х, Аликулов Ш.А. Ахмеджанов Ф.Р.и др. Теплопроводность алюминиевого сплава САВ-1 при высокой температуре. Атомная энергия, 2014, Т.116, вып.2., 78-81.
11. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов: Справочная книга. Л., «Энергия», 1974. – 264 с.
12. Кириллов П.Л., Терентьева М.И., Денискина Н.Б. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Учебное справочное пособие/Под общ. ред. проф. П.Л. Кириллова; 2-е изд., – М.:2007. – 200с.



13. Кириллов П.Л., Богословская Г.П. Теплообмен в ядерных энергетических установках: Учебник для вузов.- М.: Энергоатомиздат, 2000. – 456 с.
14. Чертков Ю.Б., Наймушин А.Г., Лебедев И.И. и др. Методика и результаты теплового расчета твэлов реактора ИРТ-Т. Известия вузов. Физика. 2013, Т.56, №4/2, 329-337.
15. Беляев С.А., Кузьмин А.В. Методика теплового и нейтронно-физического расчетов реактора на тепловых нейтронах : учебное пособие — Томск : Изд-во ТПИ, 1981. — 81 с.
16. Кузьмин А.В. Основы теории переноса нейтронов (лабораторный практикум): учеб. пособие для вузов/ 2-е издание – Томск: Изд-во ТРУ, 2010. – 192 с.
17. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов: учебное пособие для вузов/ Г.Г. Бартоломей, Г.А. Батя, В.Д. Байбаков, М.С. Алхутов; Под ред. Г.А. Батя. – М.: Энергоиздат, 1982. – 000с., ил.
18. Подготовка параметров к нейтронно-физическому расчету реактора на тепловых нейтронах: Метод. указания к выполнению индивидуального задания. А.В. Кузьмин. – Томск: Издательство ТПУ, 2009. – 61 с.
19. Определение эффективной температуры топлива реактора на тепловых нейтронах: методические указания к выполнению индивидуального домашнего задания по дисциплине «Физика ядерных реакторов – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 41с.
20. Кузьмин А.В. Экспериментальное и расчетное определение возраста нейтронов деления в различных средах: учеб. пособие для вузов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 208 с.
21. Варлачев В.А., Бузоверова Т.В., Гусаров О.Ф. и др. Лабораторный практикум на реакторе ИРТ-Т. Часть 1. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 96 с.
22. Наймушин А.Г. Энергетические характеристики активной зоны ИРТ-Т при переводе на низкообогащенное топливо: диссертация к. ф-м.н. НИ ТПУ — Томск: 2013. — 110 л.
23. Насонов В.А., Песня Ю.Е., Рязанцев Е.П. Математическое моделирование и расчетный анализ нейтронно-физических параметров ИР-8 при конверсии на низкообогащенное урановое топливо. Атомная энергия. 2014, Т.117, вып. 2., 75-81.
24. ГОСТ 21.404-85 Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах, 1986.
25. Волощенко А.В.. Проектирование систем автоматического контроля и регулирования.- Томск, 2011 – 108 с.

26. Малерс Ю.П.. «О возможности повышения эффективности исследовательского реактора ВВЭР-М». Киев, Институт ядерных исследований, 1987.
27. Сергейчик С.И. Экономика ядерной энергетики: методические указания по выполнению курсовой работы на тему: «Планирование и анализ производственной программы АТЭЦ» – Томск: Изд. ТПУ, 2010 – 27 с.
28. Экономика ядерной энергетики/ В. В. Батов, Ю. И. Корякин. - М.: Атомиздат, 1969. - 400 с.: ил.
29. В.М.Кузнецов. Ядерная безопасность. М. «Эпицентр»2003. С.461
30. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация
31. Р 2.2.2006-05 «Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда»
32. СанПиН 2.6.1.2523-09 НРБ-99/2009
33. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»
34. ГОСТ 12.1.012-90 «ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования»
35. СанПиН 2.2.4.1191-03 «Электромагнитные поля в производственных условиях»
36. ГОСТ 12.1.002-84 «ССБТ. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах»
37. СНиП 23-05-95\* «Естественное и искусственное освещение»
38. "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001
39. ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты
40. СНиП 41-01-2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха»
41. СанПиН 2.6.1.23-03 «Гигиенические требования к проектированию и эксплуатации ядерных реакторов исследовательского назначения».
42. ГОСТ 12.1.033-81 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Термины и определения»
43. ГОСТ 17.2.3.02-78 «Охрана природы. Атмосфера. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями».
44. ГОСТ 17.1.3.13-86 «Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к охране поверхностных вод от загрязнения».

|      |      |          |       |      |                    |      |
|------|------|----------|-------|------|--------------------|------|
|      |      |          |       |      | ФЮРА 693100.001.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |                    | 98   |

45. ГОСТ 17.4.3.04-85 «Охрана природы. Почвы. Общие требования к контролю и охране от загрязнения»
46. ГОСТ 27593-88 «Почвы. Термины и определения».
47. Действующий ГОСТ 17.4.2.01-81 «Охрана природы. Почвы. Номенклатура показателей санитарного состояния».
48. ГОСТ 17.4.1.02-83. «Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения».
49. ГОСТ Р 22.0.08-96 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях».
50. ГОСТ 12.1.010-76\* «Взрывобезопасность. Общие требования».
51. Федеральный закон «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний» от 24.07.1998 N 125-ФЗ.
52. Федеральный закон "О страховых взносах в Пенсионный фонд Российской Федерации, Фонд социального страхования Российской Федерации, Федеральный фонд обязательного медицинского страхования" от 24.07.2009 N 212-ФЗ.
53. Федеральный закон "О трудовых пенсиях в Российской Федерации" от 17.12.2001 N 173-ФЗ.
54. Абагян Л.П., Базаянц Н.О., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Групповые константы для расчета реакторов и защиты: Справочник.— М.: Энергоатомиздат, 1981. – 232 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

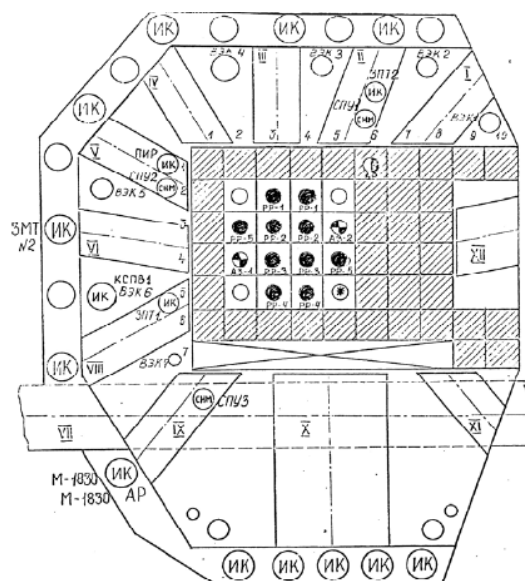


Рисунок А.1 – Поперечное сечение аз и отражателя [2]

Таблица А.1 - Исходные данные к расчету АЗ [21]

|  |                           |
|--|---------------------------|
| Мощность, $Q_0, \text{МВт}$  | 8                         |
| Число ТВС в АЗ:  | 16                        |
| -с экспериментальными каналами, $N_{\text{ТВС.к}}, \text{шт}$                                    | 4                         |
| -со стержнем СУЗ $N_{\text{ТВС.СУЗ}}, \text{шт}$   | 12                        |
| Топливо  | $\text{UO}_2 + \text{Al}$ |
| Обогащение $U^{235}, \%$   | 90                        |
| Водяной зазор между ТВС, $a_{\text{ТВС}}, \text{мм}$   | 1,05                      |
| Водяной зазор между твэл, $a_{\text{твэл}}, \text{мм}$   | 2,05                      |
| Толщина:   |                           |
| -твэла $\delta_{\text{твэл}}, \text{мм}$   | 1,4                       |
| -сердечника $\delta_{\text{с}}, \text{мм}$   | 0,4                       |
| -оболочки, $\delta_{\text{об}}, \text{мм}$   | 0,5                       |
| длина сердечника $l_{\text{с}}, \text{мм}$   | 580                       |
| Радиусы закругления в твэле, мм  |                           |
| -внешней стороны оболочки $r_1, \text{мм}$ ,   | 4,4                       |
| -внешней стороны топлива $r_2, \text{мм}$ ,  | 3,9                       |
| -внутренней стороны топлива $r_3, \text{мм}$ ,   | 3,5                       |
| -внутренней стороны оболочки $r_4, \text{мм}$ ,  | 3                         |
| Содержание урана -235 в ТВС, г   | 265                       |
| Температура теплоносителя на входе (выходе) аз $T_{\text{вх}}, (T_{\text{вых}}), ^\circ\text{C}$ | 47,5 (54,5)               |
| $P_{\text{вх}}, \text{МПа}$  | 0,19                      |
| Перепад давления в аз $\Delta P, \text{МПа}$   | 0,024                     |

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б — К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВОЗРАСТА В ОТРАЖАТЕЛЕ

Таблица Б.1- Групповые константы для Be [54]

| Группа | $E_n$          | $\Delta u$ | $\zeta$ | $\sigma_c(u)$ ,<br>барн | $\sigma_s(u)$ ,<br>барн | $\mu(u)$ | $\sigma_{ir}(u)$ ,<br>барн | $\sigma_R^{(i)}$ ,<br>барн |
|--------|----------------|------------|---------|-------------------------|-------------------------|----------|----------------------------|----------------------------|
| 4      | 2,5–1,4·МэВ    | 0,57       | 0,173   | 0,040                   | 1,86                    | 0,23     | 1,47                       | 0,56                       |
| 5      | 1,4–0,8·МэВ    | 0,57       | 0,173   | 0,003                   | 3,20                    | 0,23     | 2,47                       | 0,97                       |
| 6      | 0,8–0,4·МэВ    | 0,69       | 0,198   | 0,0                     | 3,90                    | 0,12     | 3,43                       | 1,12                       |
| 7      | 0,4–0,2·МэВ    | 0,69       | 0,202   | 0,0                     | 4,20                    | 0,10     | 3,78                       | 1,23                       |
| 8      | 0,2–0,1 МэВ    | 0,69       | 0,204   | 0,0                     | 5,10                    | 0,09     | 4,64                       | 1,51                       |
| 9      | 100,0–46,5·кэВ | 0,77       | 0,207   | 0,0                     | 5,60                    | 0,08     | 5,15                       | 1,51                       |
| 10     | 46,5–21,5·кэВ  | 0,77       | 0,209   | 0,0                     | 5,80                    | 0,07     | 5,39                       | 1,57                       |
| 11     | 46,5–21,5·кэВ  | 0,77       | 0,209   | 0,0                     | 5,90                    | 0,07     | 5,49                       | 1,60                       |
| 12     | 10,0–4,65·кэВ  | 0,77       | 0,209   | 0,0                     | 6,00                    | 0,07     | 5,58                       | 1,63                       |
| 13     | 4,65–2,15·кэВ  | 0,77       | 0,209   | 0,0                     | 6,00                    | 0,07     | 5,58                       | 1,63                       |
| 14     | 2,15–1,0·кэВ   | 0,77       | 0,209   | 0,0                     | 6,00                    | 0,07     | 5,58                       | 1,63                       |
| 15     | 1,0–0,465·кэВ  | 0,77       | 0,209   | 0,0                     | 6,00                    | 0,07     | 5,58                       | 1,63                       |
| 16     | 465–215·эВ     | 0,77       | 0,209   | 0,0                     | 6,00                    | 0,07     | 5,58                       | 1,63                       |
| 17     | 215–100·эВ     | 0,77       | 0,209   | 0,0                     | 6,00                    | 0,07     | 5,58                       | 1,63                       |
| 18     | 100–46,5·эВ    | 0,77       | 0,209   | 0,0                     | 6,00                    | 0,07     | 5,58                       | 1,63                       |
| 19     | 46,5–21,5·эВ   | 0,77       | 0,209   | 0,0                     | 6,00                    | 0,07     | 5,58                       | 1,63                       |
| 20     | 21,5–10,0·эВ   | 0,77       | 0,209   | 0,0                     | 6,00                    | 0,07     | 5,58                       | 1,63                       |
| 21     | 10,0–4,65·эВ   | 0,77       | 0,209   | 0,0                     | 6,00                    | 0,07     | 5,58                       | 1,63                       |
| 22     | 4,65–2,15·эВ   | 0,77       | 0,209   | 0,0                     | 6,00                    | 0,07     | 5,58                       | 1,63                       |
| 23     | 2,15–1,0·эВ    | 0,77       | 0,209   | 0,001                   | 6,00                    | 0,07     | 5,58                       | 1,63                       |

Таблица Б.2.- Результаты расчета возраста в группах для Be

| Группа | $E_n$          | $D^{(i)}$ ,<br>барн <sup>-1</sup> | $\sigma_a^{(i)} + \sigma_R^{(i)}$ ,<br>барн | $\tau_i$ ,<br>см <sup>2</sup> |
|--------|----------------|-----------------------------------|---|-------------------------------|
| 4      | 2,5–1,4·МэВ    | 1,829                             | 0,60  | 24,44                         |
| 5      | 1,4–0,8·МэВ    | 1,091                             | 0,97  | 9,05                          |
| 6      | 0,8–0,4·МэВ    | 0,785                             | 1,12  | 5,66                          |
| 7      | 0,4–0,2·МэВ    | 0,712                             | 1,23  | 4,68                          |
| 8      | 0,2–0,1 МэВ    | 0,580                             | 1,51  | 3,11                          |
| 9      | 100,0–46,5·кэВ | 0,523                             | 1,51  | 2,80                          |
| 10     | 46,5–21,5·кэВ  | 0,499                             | 1,57  | 2,56                          |
| 11     | 46,5–21,5·кэВ  | 0,491                             | 1,60  | 2,48                          |
| 12     | 10,0–4,65·кэВ  | 0,483                             | 1,63  | 2,39                          |
| 13     | 4,65–2,15·кэВ  | 0,483                             | 1,63  | 2,39                          |
| 14     | 2,15–1,0·кэВ   | 0,483                             | 1,63  | 2,39                          |
| 15     | 1,0–0,465·кэВ  | 0,483                             | 1,63  | 2,39                          |
| 16     | 465–215·эВ     | 0,483                             | 1,63  | 2,39                          |
| 17     | 215–100·эВ     | 0,483                             | 1,63  | 2,39                          |
| 18     | 100–46,5·эВ    | 0,483                             | 1,63  | 2,39                          |
| 19     | 46,5–21,5·эВ   | 0,483                             | 1,63  | 2,39                          |
| 20     | 21,5–10,0·эВ   | 0,483                             | 1,63  | 2,39                          |
| 21     | 10,0–4,65·эВ   | 0,483                             | 1,63  | 2,39                          |
| 22     | 4,65–2,15·эВ   | 0,483                             | 1,63  | 2,39                          |
| 23     | 2,15–1,0·эВ    | 0,482                             | 1,63  | 2,39                          |

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица В.1 – Параметры для нейтронно-физического расчета

|             |                            |                                |                               |                            |                                |
|-------------|----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| $x_{ep}$    | 5,2                        |                                |                               |                            |                                |
| $K_{ep}$    | 0,7824                     |                                |                               |                            |                                |
|             | $\Sigma_a, \text{см}^{-1}$ | $\xi \Sigma_s, \text{см}^{-1}$ | $\Sigma_{tr}, \text{см}^{-1}$ | $\Sigma_f, \text{см}^{-1}$ | $\nu \Sigma_f, \text{см}^{-1}$ |
| ТВС         | 0,115                      | 0,749                          | 1,215                         | 0,086                      | 0,209                          |
| блока       | 1,10                       | 0,0024                         | 1,228                         | 0,935                      |                                |
| замедлителя | 0,014                      | 0,825                          | 1,214                         |                            |                                |

Таблица В.2 – Результаты определения  $k_{эф}^{GP}$

|                           |       |                           |         |
|---------------------------|-------|---------------------------|---------|
| $\nu_a$                   | 2,067 | $\tau_p, \text{см}^2$     | 46,38   |
| $V_{H_2O}^0, \text{см}^3$ | 27,69 | $\tau_{omp}, \text{см}^2$ | 71,43   |
| $V_U^0, \text{см}^3$      | 0,024 | $M^2, \text{см}$          | 614,7   |
| $f$                       | 1,955 | $\delta_{эф}, \text{см}$  | 12,1    |
| $\Theta$                  | 0,823 | $B^2, \text{см}^{-2}$     | 0,00928 |
| $\phi$                    | 1     | $P_{зам}$                 | 0,65    |
| $\mu$                     | 1     | $P_{диф}$                 | 0,967   |
| $L_{зм}^2, \text{см}^2$   | 19,61 | $K_\infty$                | 1,701   |
| $L_{бл}^2, \text{см}^2$   | 0,247 | $K_{эф}$                  | 1,07    |
| $L_{реш}^2, \text{см}^2$  | 3,682 |                           |         |

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г.1 - Константы, используемые в нейтронно-физическом расчете

| Нуклид     | Группы | $\sigma_{tr}^{(k)}$ | $\sigma_c^{(k)}$ | $\sigma_f^{(k)}$ | $\nu_f^{(k)}$ | $\sigma_a^{(k)}$ | $\sigma_d^{(k)}$ | $\Sigma_{tr}^{(k)}$ | $\Sigma_c^{(k)}$ | $\Sigma_f^{(k)}$ | $\Sigma_f^{(k)} \nu_f^{(k)}$ | $\Sigma_a^{(k)}$ | $\Sigma_d^{(k)}$ |
|------------|--------|---------------------|------------------|------------------|---------------|------------------|------------------|---------------------|------------------|------------------|------------------------------|------------------|------------------|
| $U^{235}$  | 1      | 4,886               | 0,0796           | 1,169            | 2,71<br>1     | 1,248            | 1,691            | 0,0107              | 0,0002           | 0,002<br>5       | 0,0069                       | 0,0027           | 0,00369          |
|            | 2      | 7,950               | 0,4225           | 1,669            | 2,43<br>3     | 2,091            | 0,013<br>4       | 0,0173              | 0,0009           | 0,003<br>6       | 0,0089                       | 0,0046           | 2,92 E-<br>05    |
|            | 3      | 6,644               | 7,103            | 17,62<br>7       | 2,42<br>6     | 24,73            | 0,006<br>3       | 0,0145              | 0,0155           | 0,038<br>4       | 0,0933                       | 0,0539           | 1,37 E-<br>05    |
|            | 4      | 511,0<br>8          | 72,32            | 428,7<br>9       | 2,41<br>6     | 501,11           |                  | 1,115               | 0,1577           | 0,935<br>2       | 2,2594                       | 1,0929           | 0                |
| $U^{238}$  | 1      | 4,75                | 0,0399           | 0,388<br>3       | 2,73          | 0,428            | 1,912            | 0,0011<br>5         | 9,67E-<br>06     | 9,41E-<br>05     | 0,00026                      | 0,000104         | 0,00046<br>3     |
|            | 2      | 8,029               | 0,269            |                  |               | 0,269            | 0,014<br>5       | 0,0019<br>5         | 6,53 E-<br>05    |                  |                              | 6,53 E-<br>05    | 3,51 E-<br>06    |
|            | 3      | 7,888               | 22,82            |                  |               | 22,820           | 0,007<br>3       | 0,0019<br>1         | 0,00553          |                  |                              | 0,00553          | 1,77 E-<br>06    |
|            | 4      | 10,97               | 2,094            |                  |               | 2,094            |                  | 0,0026<br>6         | 0,00050<br>7     |                  |                              | 0,000507         | 0                |
| $Al_{кор}$ | 1      | 2,038               | 0,0092           |                  |               | 0,0092           | 0,387<br>1       | 0,1227              | 0,00055<br>4     |                  |                              | 0,000550         | 0,0233           |
|            | 2      | 3,809               | 0,0028           |                  |               | 0,0028           | 0,048<br>3       | 0,2294              | 0,00016<br>9     |                  |                              | 0,000169         | 0,00291          |
|            | 3      | 1,637               | 0,0167           |                  |               | 0,0167           | 0,011            | 0,0986              | 0,0010           |                  |                              | 0,0010           | 0,00066          |
|            | 4      | 1,543               | 0,178            |                  |               | 0,178            |                  | 0,0929              | 0,0107           |                  |                              | 0,0107           | 0                |
| $O$        | 1      | 1,685               | 0,043            |                  |               | 0,043            | 0,319<br>8       | 0,0081<br>7         | 0,00021          |                  |                              | 0,000208         | 0,00155          |
|            | 2      | 4,233               |                  |                  |               | 0                | 0,034<br>4       | 0,0205              | 0                |                  |                              | 0                | 0,00016<br>7     |
|            | 3      | 4,027               | 0,022            |                  |               | 0,022            | 0,047<br>8       | 0,0195              | 0,00011          |                  |                              | 0,000107         | 0,00023<br>2     |
|            | 4      | 3,604               | 0,0002<br>1      |                  |               | 0,0002<br>1      |                  | 0,0175              | 1,018E-<br>06    |                  |                              | 1,018 E-<br>06   | 0                |
| $Al$       | 1      | 2,038               | 0,0092           |                  |               | 0,0092           | 0,387<br>1       | 0,1227              | 0,00055<br>4     |                  |                              | 0,000550         | 0,0233           |
|            | 2      | 3,809               | 0,0028           |                  |               | 0,0028           | 0,048<br>3       | 0,2294              | 0,00016<br>9     |                  |                              | 0,000169         | 0,00291          |
|            | 3      | 1,637               | 0,0167           |                  |               | 0,0167           | 0,011            | 0,0986              | 0,0010           |                  |                              | 0,0010           | 0,00066          |
|            | 4      | 1,543               | 0,178            |                  |               | 0,178            |                  | 0,0929              | 0,0107           |                  |                              | 0,0107           | 0                |
| $H_2O$     | 1      | 4,80                | 0,043            |                  |               | 0                | 3,218            | 0,1587              | 0,00142          |                  |                              | 0                | 0,1064           |
|            | 2      | 9,39                | 0,0004           |                  |               | 0,0004           | 4,462            | 0,3105              | 0,00001<br>3     |                  |                              | 0,000013<br>2    | 0,1475           |
|            | 3      | 16,71               | 0,306            |                  |               | 0,284            | 4,556            | 0,5524              | 0,0101           |                  |                              | 0,00939          | 0,1506           |
|            | 4      | 59,05               | 0,51             |                  |               | 0,51             | 0                | 1,952               | 0,0169           |                  |                              | 0,01686          | 0                |